

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Επίδραση της τοπικής μεταβολής του ορίου διαρροής λόγω  
υπεργήρανσης στην διάδοση ρωγμής σε κόπωση κράματος  
Αλουμινίου 2024-T3**

υπό

**ΑΝΔΡΕΑ ΤΖΑΜΤΖΗ**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Π.Θ., 2007

Επιβλέπων: Δρ. Αλέξης Κερμανίδης, Λέκτορας Μηχανικής Συμπεριφοράς  
Μεταλλικών Υλικών

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης  
2011

© 2011 Ανδρέας Τζαμτζής

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Αλέξης Κερμανίδης Λέκτορας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Αράβας Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Γρηγόρης Ν. Χαϊδεμενόπουλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Λέκτορα κ. Αλέξη Κερμανίδη. Τον ευχαριστώ για την πολύτιμη βοήθεια του όλα αυτά τα χρόνια και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να γίνω μέλος του Εργαστηρίου Μηχανικής & Αντοχής των Υλικών.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους άλλους δύο εξεταστές της εργασίας μου Καθηγητή κ. Γρηγόρη Χαϊδεμενόπουλο και Καθηγητή κ. Νίκο Αράβα για την πολύτιμη βοήθεια τους στα πλαίσια αυτής της εργασίας αλλά και γενικότερα σε ότι χρειαζόμουν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Θέλω επίσης να ευχαριστήσω την κ. Άννα Ζερβάκη, την κ. Ελένη Καμούτση, τον κ. Μιχάλη Βλαχογιάννη, τον κ. Νίκο Χολέβα, τον κ. Θανάση Βέργο, για την βοήθεια τους και τις υποδείξεις τους κατά τη διάρκεια αυτή της εργασίας. Η βοήθεια τους υπήρξε καταλυτική για την άρτια ολοκλήρωση της. Τους είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα όλους τους φίλους μου για την ηθική υποστήριξή τους.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τη βαθιά ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Αργύρη και Γεωργία, καθώς και τον αδερφό μου και συνάδελφο Σπύρο, για την ολόψυχη αγάπη και υποστήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Ως ελάχιστο δείγμα της ευγνωμοσύνης μου, τους αφιερώνω αυτή την εργασία.

Ανδρέας Τζαμτζής

# **Επίδραση της τοπικής μεταβολής του ορίου διαρροής λόγω αναθέρμανσης στην διάδοση ρωγμής σε κόπωση κράματος Αλουμινίου 2024-T3**

ΤΖΑΜΤΖΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2010-10

## **Περίληψη**

Η θραύση λόγω κόπωσης σε μια δομή είναι ένα φαινόμενο που περιλαμβάνει την εξέλιξη ρωγμής κάτω από κυκλικά, εναλλασσόμενα φορτία. Η εξέλιξη ρωγμής λόγω κόπωσης συνδέεται με πολλούς παράγοντες όπως η μικροδομή, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, τα εφαρμοζόμενα φορτία και η γεωμετρία του δομικού στοιχείου. Σε περιοχές της δομής με τοπικά μειωμένες μηχανικές ιδιότητες (πχ. περιοχές συγκολλήσεων, περιοχές με διάβρωση) τα χαρακτηριστικά εξέλιξης ρωγμής μπορεί να υποβαθμιστούν με αποτέλεσμα να απαιτείται διαφορετικός σχεδιασμός σε τέτοια στοιχεία της δομής. Με βάση τον σχεδιασμό με ανοχή στην βλάβη είναι σημαντικό να υπάρχει γνώση της επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων στην συμπεριφορά εξέλιξης ενός ρήγματος.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της τοπικής μεταβολής του ορίου διαρροής στην διάδοση ρωγμής σε κόπωση κράματος Αλουμινίου 2024-T3. Για την δημιουργία τοπικής μεταβολής του ορίου διαρροής στο υλικό το μεταλλικό κράμα υπεβλήθη σε θερμική κατεργασία υπεργήρανσης. Οι θερμικές κατεργασίες υπεργήρανσης που επιλέχθηκαν οδήγησαν σε μεταβολή (μείωση) του ορίου διαρροής του υλικού. Η μεταβολή του ορίου διαρροής ήταν σε άλλες περιπτώσεις σταθερή και σε άλλες γραμμική (προφίλ) μπροστά από το άκρο της ρωγμής. Κατόπιν της θερμικής κατεργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές δυσθραυστότητας και εξέλιξης ρωγμής σε

κόπωση στο υλικό. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την πειραματική διερεύνηση έδειξαν ότι η συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση επηρεάζεται από την μεταβολή του ορίου διαρροής.

Για την αναλυτική πρόβλεψη της εξέλιξης ρωγμής σε κυκλικά φορτία χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας LTSM-F. Τα αναλυτικά αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα και ότι ο κώδικας έχει την ικανότητα να λαμβάνει υπόψη του την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων λόγω θερμικής κατεργασίας στην πρόβλεψη του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής σε θερμικά κατεργάσιμα μεταλλικά κράματα.

## Περιεχόμενα

<b>1.Εισαγωγή.....</b>	<b>5</b>
1.1 Γενικά.....	5
1.2 Το αντικείμενο της εργασίας.....	6
1.3 Δομή Μεταπτυχιακής Εργασίας.....	8
<b>2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....</b>	<b>9</b>
2.1 Αλουμίνιο & κράματα Αλουμινίου.....	9
2.1.1 Γενικά.....	9
2.1.2 Ιδιότητες & χρήσεις του Αλουμινίου.....	9
2.1.3 Κράματα αλουμινίου.....	10
2.1.4 Θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου σειράς 2xxx.....	14
2.1.5 Κράμα Αλουμινίου 2024 .....	15
i) Χημική Σύσταση – Μηχανικές Ιδιότητες.....	15
ii) Θερμική κατεργασία - Διάγραμμα φάσεων.....	16
2.2 Θερμική κατεργασία (γήρανση & υπεργήρανση) και η επίδραση της στην αντοχή και τη σκληρότητα.....	19
<b>3. Εξέλιξη ρωγμής σε κυκλικά φορτία.....</b>	<b>21</b>
3.1 Βασικές έννοιες Θραυστομηχανικής.....	21
3.1.1 Κριτήριο μέγιστης εκλύομενης ενέργειας (κριτήριο Griffith).....	21
3.1.2 Συντελεστής έντασης των τάσεων.....	22
3.1.3 Η ιδέα του Crack Opening Displacement (COD).....	28
3.2 Εξέλιξη ρωγμής σε κόπωση.....	30
3.3 Μεθοδολογίες πρόβλεψης ρωγμής κόπωσης υπό σταθερό εύρος τάσεων.....	34
3.4 Μοντέλο πρόβλεψης εξέλιξης ρωγμής LTSM-F.....	36
<b>4. Πειραματική Διαδικασία.....</b>	<b>41</b>
4.1 Υλικό.....	41
4.2 Μελέτη της επίδρασης του ορίου διαρροής στην συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής του 2024.....	41
4.2.1 Επιλογή θερμικών κατεργασιών για την μεταβολή του ορίου διαρροής.....	41
4.2.1.1 Ομοιόμορφη μεταβολή του ορίου διαρροής (Θερμική κατεργασία ΘΚ1).....	41
4.2.2.1Γραμμική μεταβολή του ορίου διαρροής (Θερμική κατεργασία ΘΚ2).....	43
4.2.2 Μηχανικές Ιδιότητες.....	49
4.2.2.1 Μικροσκληρομετρήσεις.....	49
4.2.2.2 Δοκιμές εφελκυσμού.....	49
4.2.2.3 Δοκιμές Δυσθραυστότητας.....	50
4.2.2.4 Δοκιμές εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση.....	52
4.2.2.5 Μέτρηση της αύξησης του μήκους ρωγμής κατά την κόπωση – Μέθοδος ενδοτικότητας (COD).....	54
4.3 Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος.....	57
<b>5. Αποτελέσματα.....</b>	<b>58</b>
5.1 Θερμικές Κατεργασίες – Διάγραμμα υπεργήρανσης.....	58
5.2 Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος.....	59
5.3 Δοκιμές εφελκυσμού.....	61
5.4 Συσχετισμός ορίου διαρροής – μικροσκληρότητας.....	62
5.5 Γραμμική μεταβολή ορίου διαρροής.....	63
5.6 Δοκιμές εξέλιξης ρωγμών.....	66

5.7 Δοκιμές Δυσθραυστότητας.....	76
<b>6. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση μέσω υπολογιστικού μοντέλου.....</b>	<b>81</b>
6.1 Αναλυτικά αποτελέσματα για μέταλλο αναφοράς και με σταθερό όριο διαρροής (ΘΚ1).....	81
6.2 Αναλυτικά αποτελέσματα για υλικό με μεταβαλλόμενο όριο διαρροής (ΘΚ2).....	87
6.2.1 Μεταβαλλόμενο όριο διαρροής με θετική κλίση.....	88
6.2.2 Μεταβαλλόμενο όριο διαρροής με αρνητική κλίση.....	90
6.3 Επίδραση της εμπειρικής παραμέτρου $m$ (συντελεστής ολκιμότητας).....	93
<b>7. Συζήτηση των αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις.....</b>	<b>97</b>
<b>8. Βιβλιογραφία.....</b>	<b>100</b>



# 1. Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Επιδίωξη του μηχανικού κατά τον σχεδιασμό μιας μηχανολογικής κατασκευής είναι η σχεδίαση της να γίνει κατά τρόπο που να εξασφαλίζει τις απαιτούμενες επιδόσεις λειτουργίας για τον προκαθορισμένο χρόνο διάρκειας ζωής της και συγχρόνως να είναι ασφαλής. Πέρα από τα παραπάνω, ο μηχανικός θέτει επίσης και τον οικονομικό στόχο του περιορισμού του κόστους της κατασκευής ώστε να είναι ανταγωνιστική. Στα αεροσκάφη, τα δομικά μέρη της κατασκευής σχεδιάζονται να φέρουν τα μηχανικά φορτία που αναπτύσσονται στις συνθήκες λειτουργίας της χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η λειτουργία και η ασφάλεια της κατασκευής. Όπως σε κάθε μηχανολογική κατασκευή, έτσι και στο αεροσκάφος, τα υλικά δομής επιλέγονται με κριτήρια αφ' ενός την ασφαλή μεταφορά των φορτίων λειτουργίας και αφ' ετέρου το κόστος.

Από την δεκαετία του 1980 και μετά η φιλοσοφία σχεδιασμού των δομικών μερών του αεροσκάφους περιλαμβάνει την 'ανοχή στη βλάβη'. Σύμφωνα με την φιλοσοφία αυτή, η ύπαρξη της βλάβης (δηλ. ρωγμής ή ρωγμών) είναι ανεκτή υπό την προϋπόθεση ότι η εξέλιξη της βλάβης ελέγχεται και ότι έχει εξασφαλιστεί ότι η αύξηση της βλάβης ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς ελέγχους δεν μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του δομικού μέρους.

Η εξέλιξη ρωγμής σε μια δομή συνδέεται με παράγοντες όπως η μικροδομή, οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού, τα εφαρμοζόμενα φορτία και η γεωμετρία του δομικού στοιχείου. Οι μηχανικές ιδιότητες (πχ. δυσθραυστότητα, όριο διαρροής) που λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό μπορεί να υποβαθμισθούν τοπικά σε περιοχές που το υλικό έχει υποστεί κατεργασία (πχ. συνδέσεις συγκόλλησης) ή σε περιοχές με διαβρωτική προσβολή όπου το υλικό παρουσιάζει μεταβολή των ιδιοτήτων ανάλογα με το βάθος διάβρωσης. Οι συνδέσεις συγκολλήσεων είναι σημεία που ευνοούν την έναρξη ρηγματώσεων σε συνδυασμό με τα φορτία κόπωσης καθώς εμφανίζουν χαρακτηριστικά όπως τοπικά μεταβαλλόμενη μικροδομή, παραμένουσες τάσεις και πιθανές γεωμετρικές ασυνέχειες.

Με βάση τον σχεδιασμό με ανοχή στην βλάβη είναι σημαντικό να υπάρχει γνώση της επίδρασης των μηχανικών ιδιοτήτων στην συμπεριφορά εξέλιξης ενός

ρήγματος α) για την κατάλληλη επιλογή υλικού που να έχει ανοχή στην βλάβη και β) για την εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός στοιχείου που περιλαμβάνει στην δομή του τοπικά μεταβαλλόμενες μηχανικές ιδιότητες (πχ. περιοχή συγκόλλησης) [1,2,3,4].

## 1.2 Το αντικείμενο της εργασίας

Το περίβλημα της ατράκτου και των πτερύγων των αεροσκαφών αποτελείται από λεπτά ελάσματα τα οποία συνενώνονται στις διαμήκεις και εγκάρσιες νευρώσεις των δομικών μερών με ηλωτές συνδέσεις, ενώ τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται σε ολοένα αυξανόμενο ρυθμό η τεχνολογία συγκολλήσεων η οποία μέσω της χρήσης ολοκληρωτών κατασκευών οδηγεί στη μείωση του βάρους με ταυτόχρονη μείωση στους ρύπους των αεροσκαφών. Οι περιοχές των συγκολλήσεων είναι κρίσιμα σημεία της δομής καθώς είναι περιοχές τοπικά μεταβαλλόμενης μικροδομής σε συνδυασμό με παραμένουσες τάσεις συγκόλλησης. Έτσι, ένα ρήγμα δημιουργείται και εξελίσσεται μέσα σε ένα νέο υλικό στην περιοχή συγκόλλησης με διαφορετική μικροδομή και τοπικά μεταβαλλόμενες μηχανικές ιδιότητες.

Στον σχεδιασμό με ανοχή στην βλάβη δομών σύγχρονων αεροσκαφών που περιλαμβάνουν συνδέσεις με συγκόλληση, πρωταρχικό ρόλο έχει η γνώση της συμπεριφοράς εξέλιξης ρωγμών στο υλικό σε φορτία κόπωσης. Η ανάλυση της συμπεριφοράς εξέλιξης ρωγμής κόπωσης είναι πολύπλοκη λόγω: i) της ανομοιογενούς μικροδομής στην περιοχή της συγκόλλησης και ii) των παραμενουσών τάσεων που δημιουργούνται στο υλικό κατά την διάρκεια της συγκόλλησης. Όσο αφορά την μικροδομή, διάφοροι παράγοντες παίζουν ρόλο στην τοπική υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού όπως οι ατέλειες τις κόλλησης αλλά και η τοπική μεταβολή της σκληρότητας και του ορίου διαρροής του υλικού.

Η επίδραση του ορίου διαρροής στην εξέλιξη ρωγμής θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου δεν έχει μελετηθεί επαρκώς μέχρι σήμερα. Περιορισμένος αριθμός εργασιών έχουν δείξει μια υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού κατόπιν θερμικής κατεργασίας λόγω γηράνσεως. Στην εργασία [5] μελετήθηκε η επίδραση της θερμικής κατεργασίας στους 130°C για 100 και 1000 ώρες ελάσματος Αλουμινίου 2024-T3 στην κόπωση με αρχική ρωγμή παράλληλα και κάθετα στη διεύθυνση έλασης καθώς και στις διευθύνσεις 60° από αυτές. Παρατηρήθηκε ότι η επίδραση της

διεύθυνσης της ρωγμής δείχνει να εξαφανίζεται μετά από εκτεταμένη έκθεση σε αυτή την θερμοκρασία. Στην εργασία [6] εξέτασαν την επίδραση θερμικών κατεργασιών στα διάφορα χαρακτηριστικά της μικροδομής και την επίδραση τους στην βλάβη λόγω κόπωσης κράματος Αλουμινίου 2024. Παρατηρήθηκε ότι με γήρανση του αρχικού κράματος μπορεί να επιτευχθεί μέχρι και 30% αύξηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση.

Στη συγκεκριμένη εργασία μελετάται η επίδραση της τοπικής μεταβολής του ορίου διαρροής αερονευπηγικού κράματος Αλουμινίου 2024-T3 λόγω υπεργήρανσης στην εξέλιξη προϋπάρχοντος ρήγματος σε κόπωση. Η μεταβολή του ορίου διαρροής ήταν σε άλλες περιπτώσεις σταθερή και σε άλλες γραμμική (προφίλ) μπροστά από το άκρο της ρωγμής. Τέλος, χρησιμοποιείται το μοντέλο κόπωσης LTSM-F [7] για την πρόβλεψη της εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις (γραμμική και ομοιόμορφη μεταβολή του ορίου διαρροής). Ειδικότερα, η εργασία περιλαμβάνει και σύγκριση των αποτελεσμάτων με την χρήση του αναλυτικού μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα. Από την εργασία αυτή αναμένεται:

- Να εξαχθούν πειραματικά δεδομένα για την επίδραση της μεταβολής του ορίου διαρροής στα χαρακτηριστικά εξέλιξης ρωγμών σε συνθήκες κόπωσης υπό σταθερό εύρος τάσης (Fatigue Crack Growth)
- Να εξαχθούν πειραματικά δεδομένα για την επίδραση της μεταβολής του ορίου διαρροής στα χαρακτηριστικά θραύσης του κράματος Αλουμινίου 2024-T3 (Fracture Toughness)
- Να γίνει έλεγχος της εγκυρότητας υπάρχοντος μοντέλου πρόβλεψης διάδοσης ρωγμής σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της εργασίας αναμένεται να βοηθήσουν:

- Στη δημιουργία βασικής γνώσης για την κατανόηση του φαινομένου της επίδρασης της μεταβολής του ορίου διαρροής στα χαρακτηριστικά κόπωσης ρηγματωμένου κράματος Αλουμινίου 2024-T3
- Στη δημιουργία πειραματικής βάσης δεδομένων για την επίδραση της μεταβολής του ορίου διαρροής σε:
  - i) Διάδοση ρωγμής λόγω κόπωσης
  - ii) Δυσθραυστότητα υλικού

### 1.3 Δομή Μεταπτυχιακής εργασίας

Η εργασία αποτελείται από 7 Κεφάλαια. Στο **Κεφ.1** ορίζεται το αντικείμενο της εργασίας, η αναγκαιότητα της διερεύνησης του προβλήματος καθώς και τα αποτελέσματα που αναμένονται να εξαχθούν. Στο **Κεφ. 2** γίνεται ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας η οποία περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τα κράματα Αλουμινίου, τις χρήσεις και τις ιδιότητες των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων καθώς και την επίδραση της θερμικής κατεργασίας στην αντοχή και τη σκληρότητα των κραμάτων αυτών. Στο **Κεφ. 3** παρατίθενται οι βασικές έννοιες από την Μηχανική των Θραύσεων και περιγράφονται οι βασικές αρχές που αφορούν την εξέλιξη ρωγμής σε κόπωση, οι μεθοδολογίες πρόβλεψης εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση υπό σταθερό εύρος τάσεων και γίνεται περιγραφή του μοντέλου πρόβλεψης εξέλιξης ρωγμής LTSM-F. Το **Κεφ. 4** αφορά την περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας. Γίνεται περιγραφή του υλικού που χρησιμοποιήθηκε και αναφέρεται αναλυτικά ο τρόπος διεξαγωγής των πειραμάτων και οι προδιαγραφές με τις οποίες πραγματοποιήθηκαν. Στο **Κεφ. 5** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Αυτά εμπεριέχουν: α) Θερμικές κατεργασίες και διαγράμματα γήρανσης β) Μικροσκοπικό οπτικό έλεγχο υλικού αναφοράς και υλικού μετά από υπεργήρανση γ) Δοκιμές μηχανικών ιδιοτήτων δ) Δοκιμές εξέλιξης ρωγμών (Διαγράμματα  $\frac{da}{dN} = f(\Delta K)$  και  $a = f(N)$ ) σταθερού εύρους κόπωσης. Στο **Κεφ.6** παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα της χρήσης του μοντέλου LTSM-F για πρόβλεψη της εξέλιξης ρωγμής λόγω κόπωσης και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Τέλος, στο **Κεφ.7** γίνεται συζήτηση των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας και διατυπώνονται σκέψεις για μελλοντική έρευνα.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### 2.1 Αλουμίνιο & κράματα Αλουμινίου

#### 2.1.1 Γενικά

Το Αλουμίνιο (Al) είναι το τρίτο κατά σειρά στοιχείο μετά το Οξυγόνο και το Υδρίτιο που συναντάται στον φλοιό της γης. Το Αλουμίνιο προέρχεται από το ορυκτό Βωξίτης που μετά από την εξόρυξή του μετατρέπεται σε Αλουμίνα και στην συνέχεια με ηλεκτρόλυση μετατρέπεται σε μέταλλο Αλουμίνιο. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες του αλουμινίου και των κραμάτων του, καθώς και η υψηλή τεχνολογία επεξεργασίας του εξηγούν το σημερινό ευρύ φάσμα εφαρμογών του. Το Αλουμίνιο είναι σήμερα ένα από τα βασικά δομικά υλικά σε κατασκευαστικές δραστηριότητες. Ανταποκρίνεται στο ακέραιο στις προσδοκίες των μηχανικών τόσο από πλευρά μηχανικών αντοχών όσο και από πλευράς αισθητικής. Ιδιαίτερα σήμερα, που η προσπάθεια εξοικονόμησης πλουτοπαραγωγικών πόρων και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελούν τον κύριο στόχο της σύγχρονης κοινωνίας, πρέπει ιδιαίτερα να τονιστεί η δυνατότητα ανακύκλωσης του Αλουμινίου. Το Αλουμίνιο, όπου και σε όποια μορφή και αν ευρίσκεται, μετά την χρήση των προϊόντων συλλέγεται και επαναχυτεύεται για την δημιουργία μετάλλου με ιδιότητες εφάμιλλες αυτών του πρωτότυπου.

#### 2.1.2 Ιδιότητες & χρήσεις του Αλουμινίου

Το Αλουμίνιο (Al) είναι ένα ελαφρύ, ελάχιστα μαγνητικό, όλκιμο και ελατό μέταλλο με υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και καλή αντανάκλαστικότητα Έχει σημείο τήξης 660 °C και στους 20°C πυκνότητα 2.7 gr/cm<sup>3</sup> και αξίζει να αναφέρουμε ότι η πυκνότητα του είναι το 1/3 από αυτή του χάλυβα. Το Αλουμίνιο έχει μέτρο ελαστικότητας 7.2 GPa. Επιπλέον, το αλουμίνιο διατηρεί την όλκιμότητά του και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες χωρίς να ψαθυροποιείται γεγονός που το καθιστά χρήσιμο για εφαρμογές σε περιβάλλον με χαμηλές θερμοκρασίες (υπό του μηδενός). Ακόμη, το Αλουμίνιο είναι ισχυρά

ηλεκτροθετικό μέταλλο και οξειδώνεται παρουσία οξυγόνου, όμως δημιουργεί παράλληλα και σε άμεση επαφή με αυτό ένα παθητικό στρώμα οξειδίου, το  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , που το προστατεύει από περαιτέρω οξείδωση [8,9].

Η θερμική και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αλουμινίου είναι αρκετά υψηλή πράγμα το οποίο το καθιστά ένα από τα προτιμητέα υλικά για μια τεράστια ποικιλία χρήσεων που σχετίζονται με μεταφορά θερμότητας και ηλεκτρισμού. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι το Αλουμίνιο είναι μη-τοξικό και γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται και από τη βιομηχανία τροφίμων. Τέλος, η καλή ανακλαστικότητα του αλουμινίου σε ολόκληρο το φάσμα της ακτινοβολίας (περίπου 80%) , το κάνει ιδανικό υλικό για τη χρήση του σε διάφορες εφαρμογές φωτισμού.

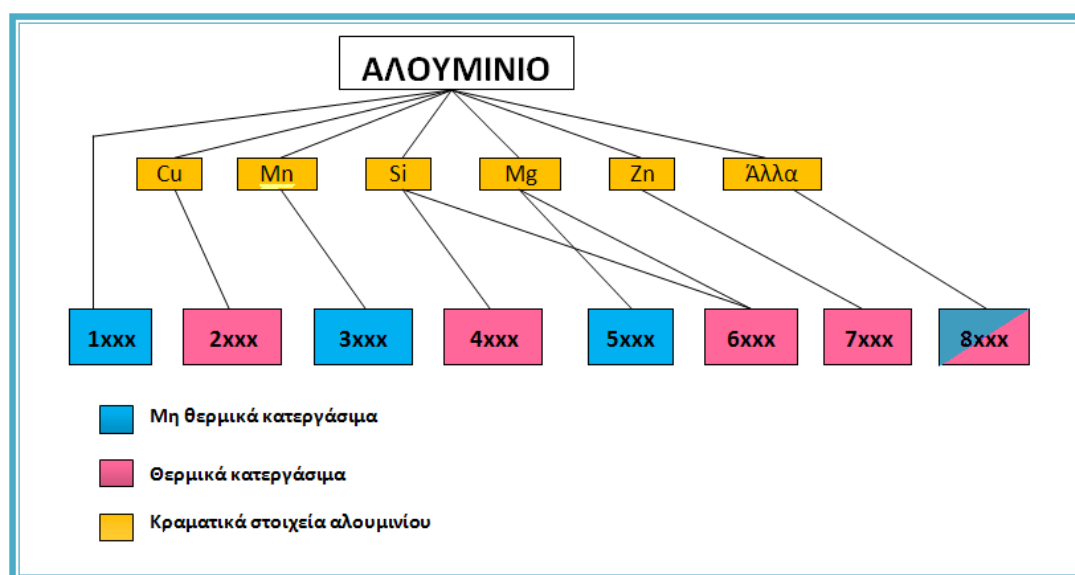
Το Αλουμίνιο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μέταλλο μετά τα χάλυβα. Βρίσκει εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς όπως σε δομικές και γενικά μεταλλικές κατασκευές(γέφυρες, θαλάσσιες πλατφόρμες, κεραίες τηλεπικοινωνιών), στη βιομηχανία μεταφορικών μέσων (αυτοκίνητα, τραίνα, αεροπλάνα) και στη ναυπηγική (πολεμικά πλοία, catamaran). Ιδιαίτερα η αεροπορική βιομηχανία απαιτεί πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιεί, όπως σκληρότητα, χαμηλό βάρος και αντοχή σε κόπωση και διάβρωση. Επιπλέον το κίνητρο για την ανάπτυξη της νέας γενιάς αεροπλάνων είναι η ανάγκη βελτίωσης της οικονομίας καυσίμων για να διατηρηθεί η κερδοφορία της βιομηχανίας αερομεταφορών. Το Αλουμίνιο πληροί τις παραπάνω προδιαγραφές γι' αυτό και χρησιμοποιείται σε μεγάλο αριθμό αεροπορικών εφαρμογών.

### 2.1.3 Κράματα αλουμινίου

Το Αλουμίνιο διατίθεται σε μεγάλη ποικιλία κραμάτων. Η επιλογή του κατάλληλου κράματος γίνεται ανάλογα με την χρήση του τελικού προϊόντος και τις ιδιαίτερες απαιτήσεις, καθώς και από την μέθοδο της παραγωγικής επεξεργασίας. Η δυνατότητα που έχει το Αλουμίνιο, να επιτυγχάνει διαφορετικές ιδιότητες προκειμένου να καλύψει τις ειδικές απαιτήσεις κάθε προϊόντος, οφείλεται στο γεγονός της εύκολης κραματοποίησης του. Με την προσθήκη μικρών ποσοτήτων κραματικών στοιχείων (π.χ. Χαλκός, Μαγνήσιο, Πυρίτιο, Μαγγάνιο, Ψευδάργυρος κλπ), μπορούμε να επιτύχουμε πρώτη ύλη αλουμινίου με τις επιθυμητές και

κατάλληλες ιδιότητες για κάθε τύπο προϊόντος. Τα κράματα Αλουμινίου είναι εύκολα διαμορφώσιμα με μεθόδους όπως έλαση, χύτευση και είναι εύκολα κατεργάσιμα.

Τα κράματα Αl συμβολίζονται με ένα σύστημα τεσσάρων ψηφίων που έχει αναπτυχθεί από την Aluminum Association. Ο συμβολισμός αυτός (**Σχήμα 2.1**) είναι ο πιο διαδεδομένος στις Η.Π.Α. και έχει επικρατήσει και στην Ευρώπη.



**Σχήμα 2.1** Συμβολισμός κραμάτων Αl

Το αλουμίνιο ενισχύεται με κράματωση με διάφορα στοιχεία. Οι κυριότερες προσθήκες στο αλουμίνιο είναι ο χαλκός, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το μαγνήσιο και ο ψευδάργυρος ενώ και άλλα στοιχεία προστίθενται σε πολύ μικρές ποσότητες για ειδικούς σκοπούς.

Στις παραπάνω σειρές, το δεύτερο ψηφίο βρίσκεται μεταξύ 0 και 9. Το ψηφίο 0 φανερώνει ότι δεν υπάρχει κάποιος ειδικός έλεγχος των χρωματικών στοιχείων. Το ψηφία μεταξύ του 1 και του 9 προσδιορίζουν κάποιο τύπο ειδικού ελέγχου, που βασίζονται στον παραγωγό του Αλουμινίου. Τα δύο τελευταία ψηφία, στη σειρά 1xxx προσδιορίζουν το ελάχιστο ποσοστό Αλουμινίου, που δεν βρίσκεται υπό ειδικό έλεγχο, ενώ στις υπόλοιπες σειρές είναι απλώς κάποιοι σειριακοί αριθμοί.

Το σύστημα συμβολισμού κατάστασης Temper Designation System βασίζεται στην ακολουθία μηχανικών ή/και θερμικών κατεργασιών που έχει υποστεί το κράμα αλουμινίου. Οι κύριες κατηγορίες συμβολίζονται με ένα λατινικό κεφαλαίο γράμμα,

στη συνέχεια του οποίου ένα ή περισσότερα νούμερα προστίθενται, τα οποία προσδιορίζουν τις υποκατηγορίες. Κάποια από τα βασικά αυτά σύμβολα είναι:

- F: δηλώνει ότι το κράμα διατηρείται όπως παράχθηκε (As Fabricated). Δεν έχει υποστεί καμία θερμική ή μηχανική κατεργασία.
- O: Ανοπτημένο (Annealed). Έχει υποστεί θερμική κατεργασία για μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων το ελάχιστο.
- H: Ψυχρά διαμορφωμένο (Strain Hardened). Χαρακτηρίζει προϊόντα που έχουν ισχυροποιηθεί με ψυχρή διαμόρφωση, με ή χωρίς επιπλέον θερμική κατεργασία. Μετά την διαμόρφωση, μπορεί να ακολουθηθεί θερμική επεξεργασία για ανόπτηση του κράματος. Το H ακολουθείται πάντα από δύο ή τρία ψηφία που δείχνουν την το είδος της ανόπτησης. Το πρώτο ψηφίο δηλώνει:
  - 1: Δεν έχει ακολουθήσει θερμική κατεργασία
  - 2: Έχει ακολουθήσει μερική ανόπτηση
  - 3: Έχει ακολουθήσει ανόπτηση

Το δεύτερο ψηφίο δηλώνει:

- 0: ανοπτημένο
- 1: 1/8 σκλήρυνση
- 2: 1/4 σκλήρυνση
- 3: 3/8 σκλήρυνση
- 4: 1/2 σκλήρυνση
- 5: 5/8 σκλήρυνση
- 6: 3/7 σκλήρυνση
- 7: 7/8 σκλήρυνση
- 8: Πλήρης σκλήρυνση
- 9: Αυξημένη σκλήρυνση

- W: εκφράζει το θερμικά επεξεργασμένο με κατεργασία διαλυτοποίησης (Solution Heat Treated). Είναι μια ασταθής κατάσταση (temper) η οποία είναι εφαρμόσιμη μόνο σε κράματα που η αντοχή (strength) τους αλλάζει σε



θερμοκρασία δωματίου μέσα σε διάστημα μηνών ή ακόμα και ετών μετά την διαλυτοποίηση (Solution Heat Treatment).

- T: δηλώνει το θερμικά επεξεργασμένο κράμα (Heat Treated). Χαρακτηρίζει προϊόντα που έχουν ισχυροποιηθεί με θερμική κατεργασία, με ή χωρίς επιπλέον ψυχρή διαμόρφωση. Το σύμβολο T ακολουθείται πάντα από ένα ή περισσότερα ψηφία, που φανερώνουν βασικές θερμικές διαδικασίες. Αυτά είναι:

3: Διαλυτοποίηση, ψυχρή διαμόρφωση, φυσική γήρανση

4: Διαλυτοποίηση, φυσική γήρανση

5: Ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, τεχνητή γήρανση

6: Διαλυτοποίηση, τεχνητή γήρανση

8: Διαλυτοποίηση, ψυχρή διαμόρφωση, τεχνητή γήρανση

9: Διαλυτοποίηση, τεχνητή γήρανση και ψυχρή διαμόρφωση

10: Ψύξη από υψηλή θερμοκρασία, τεχνητή γήρανση και ψυχρή διαμόρφωση

Τα χυτά κράματα Αλουμινίου έχουν ως κύρια κραματικά συστατικά τον Χαλκό, το Πυρίτιο, το Μαγνήσιο, τον Ψευδάργυρο, το Νικέλιο, το Μαγγάνιο, το Χρώμιο και το Βηρύλλιο. Χρησιμοποιείται διαφορετικό σύστημα αρίθμησης για τα κράματα αυτά.

Παρακάτω θα δοθεί μια σύντομη περιγραφή των πιο σημαντικών χαρακτηριστικών επεξεργασίας των κραμάτων αλουμινίου:

- Κατεργασιμότητα (Machinability): Η κατεργασιμότητα των περισσότερων κραμάτων αλουμινίου είναι πάρα πολύ καλή. Εξαρτάται από το κράμα και από την κατάσταση του (temper). Ειδικά εργαλεία και τεχνικές χρειάζονται σε αρκετές περιπτώσεις για την κατεργασία.
- Chemical Milling: Πρόκειται για αφαίρεση υλικού με χημική προσβολή από αλκαλικό ή όξινο διάλυμα. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την ομοιόμορφη μείωση του πάχους σύνθετων κατασκευών. Χρησιμοποιείται ευρέως σε σύνθετα αεροπορικά εξαρτήματα για να επιτευχθεί η μέγιστη αναλογία αντοχής-βάρους.

- Διαμορφωσιμότητα: Η διαμορφωσιμότητα είναι από τα πιο σπουδαία χαρακτηριστικά των κραμάτων αλουμινίου. Η επιλογή της κατάστασης (temper) είναι πολύ σημαντική.
- Σφυρηλατότητα: Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να σφυρηλατηθούν σε μια πληθώρα σχημάτων. Σε γενικές γραμμές η σφυρηλατότητα τους είναι μικρότερη συγκρινόμενη με αυτή των ανθρακούχων χαλύβων και πολλών άλλων χαλύβων. Σε σύγκριση όμως με τα κράματα νικελίου/κοβαλτίου, είναι πιο εύκολα σφυρηλατήσιμα.
- Συνδεσιμότητα: Τα κράματα αλουμινίου μπορούν να συνδεθούν με ένα μεγάλο εύρος μεθόδων, όπως resistance welding, brazing, soldering, μηχανικές συνδέσεις όπως riveting και bolting [3,8,10].

#### 2.1.4 Θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου σειράς 2xxx

Η ανάπτυξη των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων αλουμινίου σειράς 2xxx είχε ως αρχικό στόχο τη μείωση του βάρους των αεροσκαφών και των δομικών στοιχείων των διαστημοπλοίων, λόγω της μικρής τους πυκνότητας, της υψηλής μηχανικής τους αντοχής και του υψηλού ειδικού μέτρου ελαστικότητας. Σήμερα πλέον, βρίσκουν και άλλες εφαρμογές λόγω της πολύ καλής αντοχής τους σε κόπωση και της υψηλής μηχανικής αντοχής τους σε χαμηλές θερμοκρασίες (π.χ. δεξαμενές υγρού υδρογόνου).

Πρόκειται για κράματα Al-Cu, όπου ο χαλκός περιέχεται σε ποσοστά 2,6–6,3% και για κράματα Al-Cu-Mg, όπου το μαγνήσιο κυμαίνεται μεταξύ 0,5–1,5%. Η σκλήρυνση της δομής επιτυγχάνεται με κατακρήμνιση των ενώσεων  $\text{CuAl}_2$  (φάσεις  $\theta$ ,  $\theta'$ ) και  $\text{CuMgAl}_2$  (φάση S), που προσδίδουν στο κράμα εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες.

Η προσθήκη Si και Mn, σε ποσοστά μικρότερα του 0,8%, ευνοεί τον σχηματισμό τετραμερών συστατικών τα οποία βρίσκονται σε διασπορά και βελτιώνουν τις ιδιότητες της μεταλλικής μήτρας.

Η παρουσία Fe συχνά αποδεικνύεται βλαβερή, εξαιτίας του σχηματισμού της ένωσης  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ , η οποία στερεί από το στερεό διάλυμα μέρος του χαλκού, ελαττώνοντας τη δυνατότητα σκλήρυνσης της δομής. Ωστόσο, αν προστεθεί συγχρόνως και Ni,

σχηματίζεται η ένωση  $Al_9FeNi$ , που προσδίδει στο κράμα πολύ καλή μηχανική αντοχή, μέχρι τους  $230^{\circ}C$ .

Τα κράματα της σειράς 2000, μετά από βαφή και γήρανση, έχουν μέτρια αντοχή στη διάβρωση και συγκολλώνται δύσκολα διότι οι ζώνες, οι γειτονικές προς την περιοχή της συγκόλλησης, υπόκεινται σε ανόπτηση εξαιτίας του επιβαλλόμενου από τη συγκόλληση θερμικού κύκλου, με αποτέλεσμα, οι μηχανικές τους ιδιότητες να εξασθενούν σημαντικά [11].

#### 2.1.5 Κράμα Αλουμινίου 2024

Το κράμα αλουμινίου 2024 δημιουργήθηκε την δεκαετία του '40 και είναι διαθέσιμο σε ελάσματα και πλάκες με επικάλυψη μικρής στρώσης καθαρού αλουμινίου (Alclad 2024), αλλά και χωρίς επικάλυψη (Bare 2024). Το κράμα 2024 χρησιμοποιείται σε δομές αεροναυπηγικών κατασκευών λόγω των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων σε συνδυασμό με ικανότητα ανοχής στην βλάβη και χαμηλό βάρος. Η χρήση του 2024 σε διάφορες εφαρμογές, όπως και όλων των θερμικά κατεργάσιμων κραμάτων, προϋποθέτει συνήθως κάποια θερμική κατεργασία προκειμένου το υλικό να αποκτήσει τις απαιτούμενες μηχανικές ιδιότητες. Οι τυπικότερες μορφές που συναντάμε το κράμα αλουμινίου 2024, όσο αφορά τις θερμικές κατεργασίες είναι: -O, -T3, -T4, T8.

##### *i) Χημική Σύσταση – Μηχανικές Ιδιότητες*

Η Χημική σύσταση καθώς και οι χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες του κράματος 2024 σε διάφορες θερμικές κατεργασίες δίνονται στους **Πίνακες 2.1** και **2.2** αντίστοιχα.

**Πίνακας 2.1** Χημική σύσταση (κ.β. %) κράματος 2024

Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Cr	Zn	Ti	Other Each	Other Total
90.7 - 94.7	3.80 - 4.90	1.20 - 1.80	0.30 - 0.90	max. 0.50	max. 0.50	max. 0.10	max. 0.25	max. 0.15	max. 0.050	max. 0.15

**Πίνακας 2.2** Τυπικές μηχανικές ιδιότητες κράματος 2024-T3

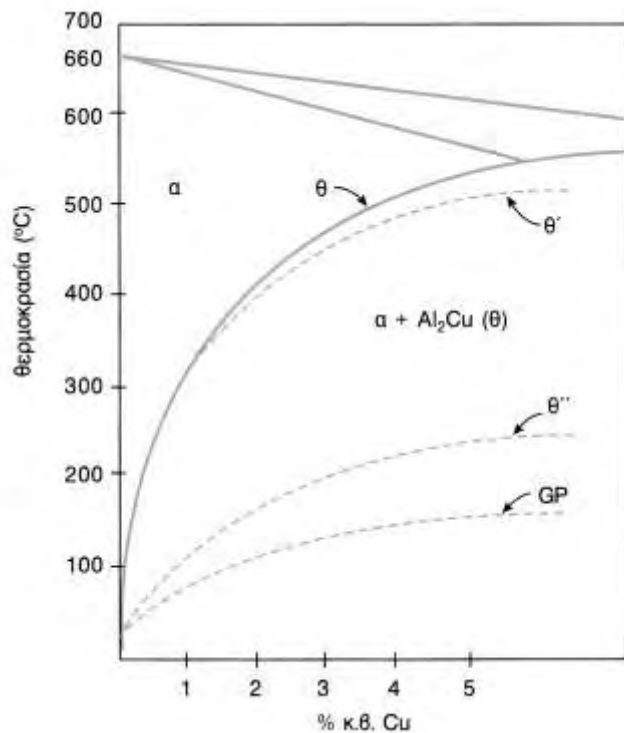
Θερμική κατεργασία	Όριο Θραύσης $R_m$ (MPa)	Όριο διαρροής $R_{0.2}$ (MPa)	Παραμόρφωση θραύσης $\varepsilon_f$ (%)	Μέτρο Ελαστικότητας E (GPa)
<b>Bare 2024</b>				
0	185	75	20	73.1
T3	485	345	18	73.1
T4,T351	470	325	20	73.1
T361	495	395	13	73.1
<b>Alclad 2024</b>				
0	180	75	20	73.1
T3	450	310	18	73.1
T4,T351	440	290	19	73.1
T361	460	365	11	73.1
T81, T851	450	415	6	73.1
T861	485	455	6	73.1

ii) *Θερμική κατεργασία - Διάγραμμα φάσεων*

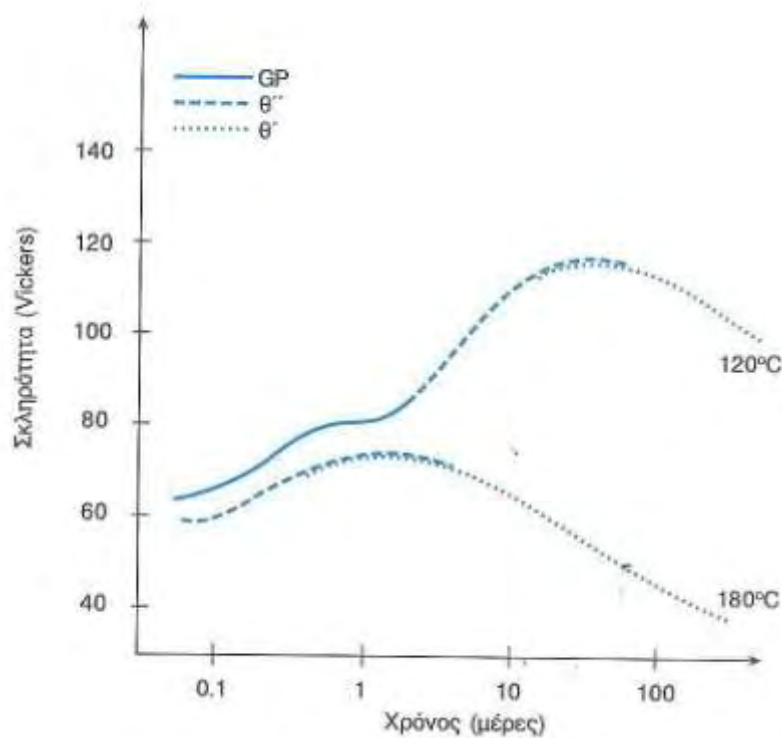
Η ισχυροποίηση των κραμάτων αλουμινίου μέσω θερμικής κατεργασίας πραγματοποιείται με καθίζηση (precipitation hardening). Στο κράμα 2024-T3 (Bare ή Alclad) η ισχυροποίηση γίνεται με κατακρήμνιση των τόσο των ενώσεων  $\text{CuAl}_2$  (φάσεις  $\theta$ ,  $\theta'$ ) σε περιοχές με χαμηλό ποσοστό Mg, όσο και των  $\text{CuMgAl}_2$  (φάση S) σε περιοχές με υψηλότερο ποσοστό. Η θερμική κατεργασία που εφαρμόζεται για την ισχυροποίηση με καθίζηση αποτελείται από 3 βήματα:

- Διαλυτοποίηση (solution treatment): Θέρμανση πάνω από την καμπύλη solvus ( $540^\circ\text{C}$ ) για την διαλυτοποίηση των φάσεων  $\theta$ , S και τον σχηματισμό ομογενούς στερεού διαλύματος Al-Cu (φάση  $\alpha$ ).
- Βαφή (quench): Απότομη ψύξη στη θερμοκρασία δωματίου. Λόγω της απουσίας διαχύσεως, το στερεό διάλυμα της φάσεως  $\alpha$  παραμένει ως έχει με τη διαφορά ότι καθίσταται υπέρκορο (supersaturated) στη θερμοκρασία δωματίου. Έτσι αναπτύσσεται μια μεγάλη κινούσα δύναμη για την καθίζηση των φάσεων  $\theta$ , S.
- Φυσική γήρανση (natural aging): Η ενεργοποίηση της διαχύσεως σε συνδυασμό με τη μεγάλη κινούσα δύναμη προκαλεί την καθίζηση των φάσεων  $\theta$ , S.

Στα **Διαγράμματα 2.1** και **2.2** παρουσιάζεται το σχετικό τμήμα του διαγράμματος φάσεων Al-Cu και τη μεταβολή της σκληρότητας του κράματος Al-4%Cu με το χρόνο γηράνσεως για 2 θερμοκρασίες γηράνσεως.

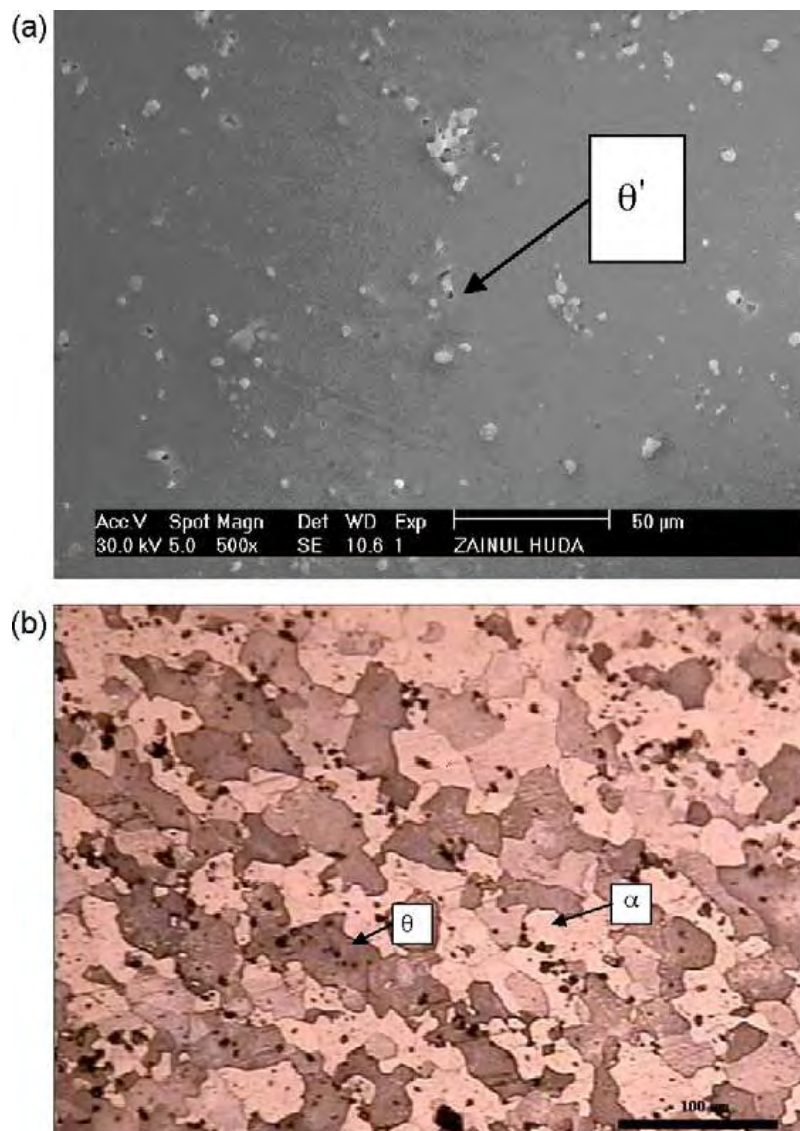


**Διάγραμμα 2.1** Τμήμα του Διαγράμματος Φάσεων του Συστήματος Al-Cu με τις Καμπύλες Solvus των μετασταθών Φάσεων και της θ [12]



**Διάγραμμα 2.2** Μεταβολή της σκληρότητας του κράματος Al-4%Cu σε σχέση με το χρόνο γήρανσεως για 2 θερμοκρασίες γήρανσεως, 120 και 180°C [12]

Στην **Εικόνα 2.1** παρατηρείται η μικροδομή κράματος 2024 T-3 με οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Στις εικόνες αυτές φαίνονται χαρακτηριστικά και ορισμένα από τα σωματίδια ισχυροποίησης. Η  $\alpha$  φάση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι το στερεό διάλυμα χαλκού μαζί με άλλα κραματικά στοιχεία μέσα στο πλέγμα FCC του αλουμινίου. Η  $\theta$  φάση αναφέρεται στην κατακρήμνιση των ενώσεων  $\text{CuAl}_2$  και η διαφορά της με την μετασταθή φάση  $\theta'$  οπτικά είναι ότι η δεύτερη έχει βελονοειδή μορφή, ενώ η πρώτη εμφανίζεται σε λεπτή διασπορά μέσα στην μικροδομή [3,12,13].



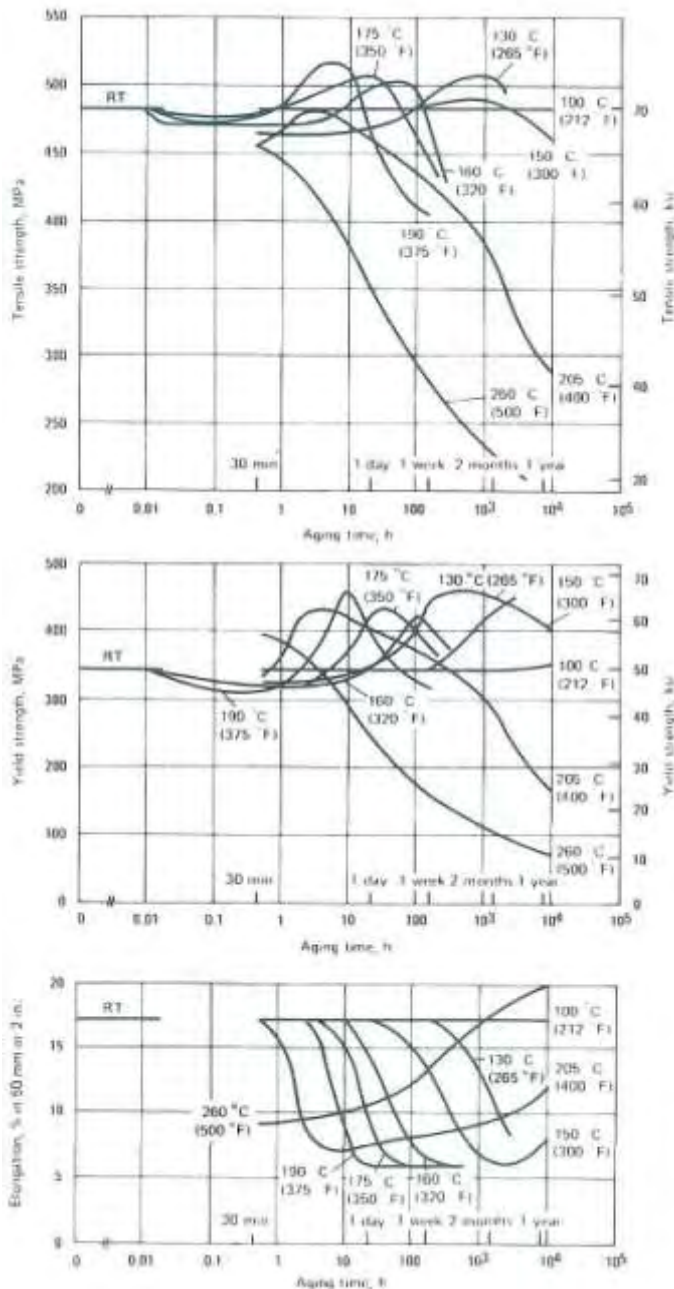
**Εικόνα 2.1** Μικροδομή κράματος Al 2024 με χρήση: (a) Ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (b): οπτικού μικροσκοπίου [13]

## 2.2 Θερμική κατεργασία (γήρανση & υπεργήρανση) και η επίδραση της στην αντοχή και τη σκληρότητα

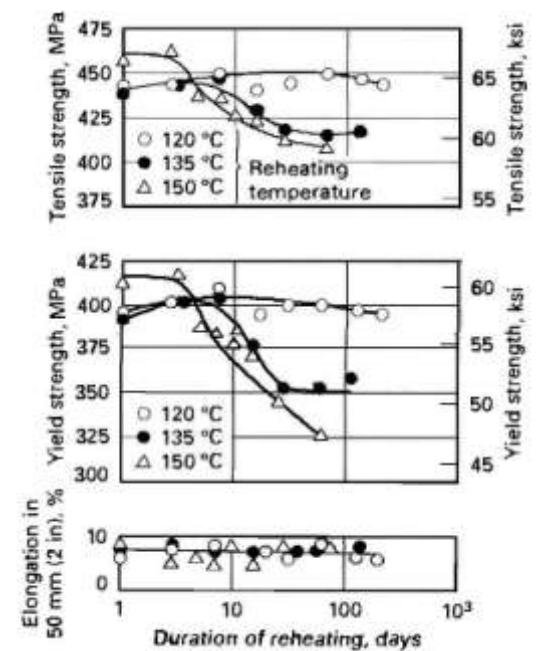
Προηγουμένως, αναφέρθηκε ότι προκειμένου να αυξηθεί την αντοχή τους, τα θερμικά κατεργάσιμα κράματα αλουμινίου υποβάλλονται σε θερμική κατεργασία με ή χωρίς επιπλέον ψυχρή διαμόρφωση. Η ισχυροποίηση αυτών των κραμάτων πραγματοποιείται με καθίζηση μέσω τεχνητής γήρανσης αν το κράμα θερμαίνεται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου και κάτω από την καμπύλη solvus και σε φυσική γήρανση αν η καθίζηση πραγματοποιείται αυθόρμητα σε θερμοκρασία δωματίου. Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω η θερμική κατεργασία για την καθίζηση των φάσεων ισχυροποίησης αποτελείται από την διαλυτοποίηση, τη βαφή και τη γήρανση. Η αντοχή και η σκληρότητα του κράματος εξαρτάται από την θερμοκρασία και τον χρόνο γήρανσεως. Οι διαφορετικές μετασταθείς φάσεις που σχηματίζονται κατά την καθίζηση παρουσιάζουν διαφορετική ειδική αντίσταση στην παρεμπόδιση της ολισθήσεως των αταξιών. Για παράδειγμα, σε ένα διφασικό κράμα Al-4Cu, η μέγιστη σκληρότητα είναι αποτέλεσμα συνδυασμού των φάσεων θ'' και θ'. Η θ' σχηματίζεται σε ημισυνοχή με τη μήτρα ενώ η διασπορά ταυτόχρονα αρχίζει να υφίσταται διεύρυνση (coarsening). Κατά τη διεύρυνση, το μέγεθος και η ενδιάμεση απόσταση μεταξύ των σωματιδίων της φάσεως θ' αυξάνεται. Οι αταξίες υπερβαίνουν τα εμπόδια ευκολότερα και έτσι η σκληρότητα μειώνεται με το χρόνο γήρανσεως, με αποτέλεσμα την υπεργήρανση του κράματος [12].

Όπως παρατηρείται από τα παραπάνω, η μηχανικές ιδιότητες τέτοιων κραμάτων είναι άμεσα εξαρτώμενες από το ιστορικό θέρμανσης του υλικού. Για μια δεδομένη κατάσταση του υλικού ύστερα από κατάλληλη θερμική κατεργασία, μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί σε περίπτωση που το υλικό αυτό εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες, είτε λόγω συνθηκών λειτουργίας είτε κατά την παραγωγή κάποιου εξαρτήματος στο οποίο γίνεται χρήση του υλικού. Για μια τέτοια αναθέρμανση του υλικού, το στάδιο στο οποίο βρίσκονται τα σωματίδια της φάσης ισχυροποίησης παίζει σημαντικό ρόλο στην πιθανή μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Προκειμένου να είναι γνωστό πως συμπεριφέρεται ένα κράμα τόσο σε μια θερμική κατεργασία όσο και ύστερα από μια αναθέρμανση, θα πρέπει να κατασκευασθούν ή να ελεγχθούν από βιβλιογραφία, κάποιες καμπύλες (καμπύλες γήρανσης) στις οποίες αποτυπώνεται η συμπεριφορά του κράματος σε συνάρτηση με θερμοκρασία και

χρόνο. Στα **Διαγράμματα 2.3** και **2.4** παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες τέτοιες καμπύλες.



**Διάγραμμα 2.3** Χαρακτηριστικά γήρανσης ελάσματος Al 2024 [9]



**Διάγραμμα 2.4** Επίδραση αναθέρμανσης ελάσματος Alclad 2024-T81 στις μηχανικές του ιδιότητες [9]



### 3. Εξέλιξη ρωγμής σε κυκλικά φορτία

Στο Κεφάλαιο αυτό διατυπώνονται τα βασικά κριτήρια αστοχίας και σχεδιασμού της γραμμικής Μηχανικής των Θραύσεων. Τα κριτήρια αυτά αναφέρονται στην συμπεριφορά μιας ρωγμής σε μονοτονικές και μεταβαλλόμενες συνθήκες καταπόνησης. Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές μεθοδολογίες πρόβλεψης εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση υπό σταθερό εύρος τάσεων και τέλος γίνεται αναφορά στο μοντέλο εξέλιξης ρωγμής LTSM-F που χρησιμοποιείται στο Κεφ. 6 στην παρούσα εργασία.

#### 3.1 Βασικές έννοιες θραυστομηχανικής

##### 3.1.1 Κριτήριο μέγιστης εκλυόμενης ενέργειας (κριτήριο Griffith)

Το κριτήριο της εκλυόμενης ενέργειας διατυπώθηκε από τον ισολογισμό των ενεργειών που λαμβάνουν χώρα κατά την διάδοση μιας ρωγμής. Σύμφωνα με το κριτήριο, μια ρωγή διαδίδεται όταν η εκλυόμενη ενέργεια σε μια απειροστά μικρή αύξηση της ρωγμής, είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία των νέων ελεύθερων επιφανειών. Η συνθήκη διάδοσης κατά Griffith δίνεται από τη σχέση:

$$G \leq R \quad (3.1)$$

όπου,

$$G = \frac{\sigma_0^2 \pi a}{E} \quad , \text{ ο ρυθμός της εκλυόμενης ενέργειας}$$

$$R = 2\gamma = G_{cr} \quad , \text{ η αντίσταση που προβάλλει το υλικό στη θραύση}$$

Τα μεγέθη  $E$  και  $\gamma$  εκφράζουν το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και την ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια ελεύθερης επιφάνειας, ενώ το  $a$  είναι το μήκος της ρωγμής. Η χαρακτηριστική τιμή  $G_{cr}$  εκφράζει την ικανότητα του υλικού να ανέχεται ή όχι την ύπαρξη ρωγμών και επομένως αποτελεί ένα μέτρο, που χαρακτηρίζει την

δυσθραυστότητα ( $G_{cr}$  μεγάλη τιμή) ή την ευθραυστότητα ενός υλικού ( $G_{cr}$  μικρή τιμή). Έτσι, το κριτήριο Griffith διατυπώνεται στην μορφή:

$$G \leq G_{cr} \quad (3.2)$$

Το κριτήριο Griffith εφαρμόστηκε επιτυχώς σε ψαθυρά υλικά [4,14].

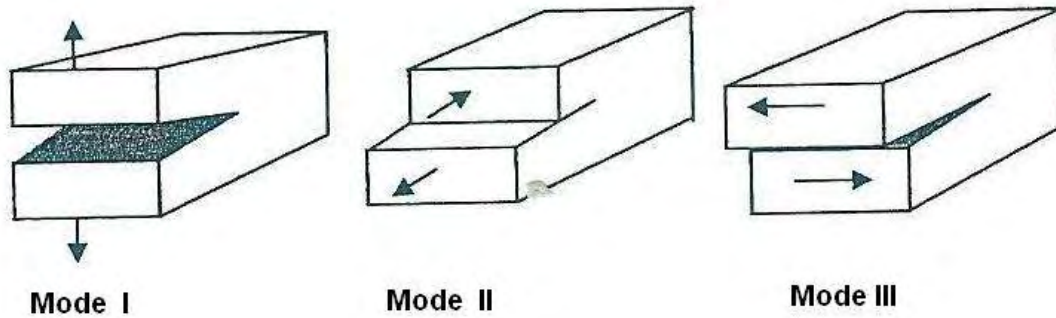
### 3.1.2 Συντελεστής έντασης των τάσεων

Ο Irwin χρησιμοποιώντας τις αρχές της θεωρίας ελαστικότητας, έδειξε ότι το εντατικό πεδίο στη γύρω περιοχή μιας ρωγμής σε ένα ελαστικό σώμα μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια τριών ειδών καταπόνησης της ρωγμής (Fracture Modes) που οδηγούν σε χαρακτηριστικές παραμορφώσεις της ρωγμής. Στο **Σχήμα 3.1** παριστάνονται οι τρεις αυτές διακριτές μορφές θραύσης που κατά Irwin ονομάζονται Mode I, Mode II, Mode III. Συγκεκριμένα:

**Mode I** (opening mode): Οι επιφάνειες της ρωγμής μετατοπίζονται κάθετα προς το επίπεδο της ρωγμής λόγω εφελκυστικών καταπονήσεων.

**Mode II** (shearing mode): Οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη εξαιτίας διατμητικών δυνάμεων που δρουν σε αντίθετη διεύθυνση και βρίσκονται στο επίπεδο κάθετα προς το ίχνος της ρωγμής

**Mode III** (tearing mode): Οι επιφάνειες της ρωγμής ολισθαίνουν η μία πάνω στην άλλη εξαιτίας διατμητικών δυνάμεων που δρουν σε αντίθετη διεύθυνση και βρίσκονται στο επίπεδο παράλληλα προς την ακμή της ρωγμής



**Σχήμα 3.1** Βασικές Μορφές καταπόνησης ρωγμών (Fracture Modes)

Κατά Irwin, οι τάσεις στη γύρω περιοχή μιας ρωγμής μπορεί για κάθε είδος καταπόνησης να εκφραστούν ως συνάρτηση μιας παραμέτρου  $K$  στη μορφή:

$$\begin{aligned}\sigma_{ij}^{(I)} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_I(\theta) & (\text{mode I}) \\ \sigma_{ij}^{(II)} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{II}(\theta) & (\text{mode II}) \\ \sigma_{ij}^{(III)} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{III}(\theta) & (\text{mode III})\end{aligned}\tag{3.3}$$

όπου  $f_i(\theta)$  είναι τριγωνομετρικές συναρτήσεις. Η παράμετρος  $K_i$  εκφράζει την ένταση του ταστικού πεδίου στην κορυφή της ρωγμής και ονομάζεται συντελεστής έντασης τάσεων.

Το εντατικό πεδίο στη γύρω περιοχή μιας ρωγμής σε ένα ελαστικό ομογενές υλικό μπορεί να περιγραφεί στη μορφή:

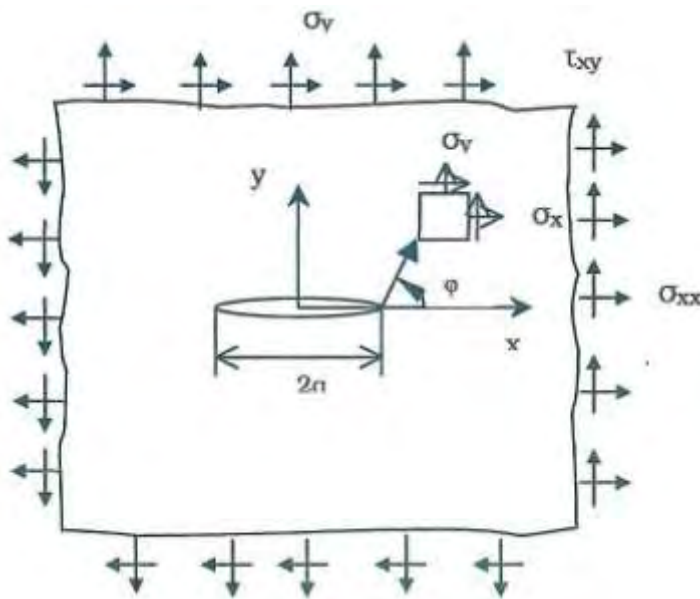
$$\sigma = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_I(\theta) + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} f_{II}(\theta) + \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} f_{III}(\theta)\tag{3.4}$$

και για άπειρο σώμα με ρωγμή μήκους  $2a$  (**Σχήμα 3.2**) η σχέση (3.4) έχει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \begin{bmatrix} 1 - \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2} \\ 1 + \sin\frac{\theta}{2} \sin\frac{3\theta}{2} \\ \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \begin{bmatrix} -(2 + \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2}) \\ \cos\frac{\theta}{2} \cos\frac{3\theta}{2} \\ \cos\frac{\theta}{2} - \sin\frac{3\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\sin\frac{\theta}{2} \\ \cos\frac{\theta}{2} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$\sigma_{zz} = 0$  , για επίπεδη παραμόρφωση

$\sigma_{zz} = y (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$  , για επίπεδη ένταση



**Σχήμα 3.2** Άπειρο ελαστικό επίπεδο σώμα με ρωγμή μήκους  $2a$

Οι μετατοπίσεις  $u$  και  $v$  στο επίπεδο  $x, y$  στην διεύθυνση  $x$  και  $y$  αντίστοιχα, περιγράφονται από το νόμο:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} \cos\frac{\theta}{2} (\kappa - 1 + 2\sin^2\frac{\theta}{2}) \\ \sin\frac{\theta}{2} (\kappa + 1 - 2\cos^2\frac{\theta}{2}) \end{bmatrix} + \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \begin{bmatrix} \sin\frac{\theta}{2} (\kappa + 1 + 2\cos^2\frac{\theta}{2}) \\ -\cos\frac{\theta}{2} (\kappa - 1 - 2\sin^2\frac{\theta}{2}) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

όπου,

$\kappa = (3-\nu) / (1+\nu)$  , για επίπεδη παραμόρφωση

$\kappa = 3-4\nu$  ,για επίπεδη ένταση

$\nu$  η σταθερά Poisson και  $G$  το μέτρο διάτμησης του υλικού.

Το εντατικό πεδίο και το πεδίο των μετατοπίσεων στην γύρω περιοχή της ρωγμής δεν εξαρτώνται από το μέγεθος της ρωγμής και την ένταση των φορτίων που καταπονούν το σώμα. Τα μεγέθη αυτά εμπεριέχονται στον αντίστοιχο συντελεστή έντασης των τάσεων:

$$\begin{aligned} K_I &= \beta_I \sigma_{yy}^{\infty} \sqrt{\pi a} \\ K_{II} &= \beta_{II} \tau_{xy}^{\infty} \sqrt{\pi a} \\ K_{III} &= \beta_{III} \tau_{yz}^{\infty} \sqrt{\pi a} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Στις εξισώσεις (3.7) οι τάσεις  $\sigma$  και τα συμβολίζουν τις εφαρμοζόμενες τάσεις στο άπειρο (δηλ. μακριά από την ρωγμή), ενώ τα μεγέθη  $\beta_i$  είναι διορθωτικοί συντελεστές που εξαρτώνται από το είδος της καταπόνησης, την γεωμετρία του ρηγματωμένου σώματος και τα χαρακτηριστικά της ρωγμής (θέση, μήκος, προσανατολισμός).

Στη συνέχεια θα συνεχίσουμε την αναφορά μας μόνο σε θέματα που αφορούν κατάσταση καταπόνησης Mode I, μιας και η παρούσα εργασία αφορά τέτοιου είδους καταπονήσεις.

Ο Irwin συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.1) και (3.3α) έδειξε ότι μεταξύ του συντελεστή έντασης τάσεων  $K$  και του ρυθμού εκλυόμενης ενέργειας  $G$  υπάρχει ομοιότητα, που σημαίνει ότι, το έργο που παράγεται από το εντατικό πεδίο στην κορυφή της ρωγμής κατά την εξέλιξη της ρωγμής από το μήκος ( $a$ ) στο μήκος ( $a + da$ ) είναι τυπικά τουλάχιστον ίδιο με τη μεταβολή της ενέργειας παραμόρφωσης ( $Gda$ ). Από τα όσα αναφέραμε παραπάνω, προκύπτει:

$$G_I = \frac{1}{E} K_I^2 \quad , \text{ για επίπεδη ένταση} \quad (3.8)$$

$$G_I = \frac{1-\nu^2}{E} K_I^2 \quad , \text{ για επίπεδη παραμόρφωση}$$

όπου  $\nu$  η σταθερά Poisson και  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Επομένως, το κριτήριο θραύσης (3.2) τροποποιείται έτσι στη μορφή:

$$K \leq K_c \quad (3.9)$$

όπου  $K_c$  ο κρίσιμος συντελεστής έντασης.

Το κριτήριο βρίσκει μεγάλη εφαρμοσιμότητα σε προβλήματα θραύσης Mode I αλλά και σε προβλήματα μεικτής θραύσης, σε προβλήματα για την εκτίμηση της έναρξης της θραύσης όχι όμως και για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης της εξέλιξης ρωγμής.

Στο ενεργειακό κριτήριο Griffith καθοριστικό μέγεθος για την εκκίνηση της ρωγμής αποτελεί η διαθέσιμη ποσότητα ενέργειας παραμόρφωσης. Κατά Irwin, μόνο ένα μέρος της ποσότητας αυτής διατίθεται για τη δημιουργία νέων επιφανειών, ενώ το μεγαλύτερο μέρος αυτής καταναλώνεται για τη δημιουργία πλαστικών παραμορφώσεων στην γύρω περιοχή της ρωγμής. Οι πλαστικές όμως παραμορφώσεις εξαρτώνται από το είδος της εντατικής κατάστασης, από το υλικό και από την γεωμετρία του σώματος και μπορεί να εκτείνονται σε πολύ μικρή περιοχή γύρω από τη ρωγμή ή να είναι έντονες και να οδηγήσουν σε πλαστική κατάρρευση.

Η δημιουργία πλαστικών παραμορφώσεων στα άκρα της ρωγμής επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά της ρωγμής. Κατά Irwin, η ύπαρξη της πλαστικής ζώνης στα άκρα της ρωγμής κάνει τη ρωγμή να συμπεριφέρεται σαν να ήταν μεγαλύτερη κατά  $r_{\pi\lambda}$ , όπου  $r_{\pi\lambda}$  το μισό μήκος της πλαστικής ζώνης. Για μικρές σχετικά πλαστικές παραμορφώσεις ο συντελεστής έντασης τάσεων υπολογίζεται με βάση το μήκος της υποθετικής ρωγμής:

$$K_{eff} = \beta \sqrt{\pi \alpha_{eff}} \sigma \quad (3.10)$$

όπου

$$\alpha_{eff} = \alpha + r_{\pi\lambda} \quad (3.11)$$

και

$$r_{\pi\lambda} = \frac{K_I^2}{2\pi\sigma_F^2} \quad (\text{κατά Irwin}) \quad (3.12)$$

$$r_{\pi\lambda} = \frac{\pi}{16} \left( \frac{K_I}{\sigma_F} \right)^2 \quad (\text{κατά Dugdale}) \quad (3.13)$$

όπου  $\sigma_F$  το όριο διαρροής του υλικού. Σύμφωνα με το κριτήριο (3.9) όταν η εφαρμοζόμενη τάση  $\sigma$  φθάσει την κρίσιμη τάση  $\sigma_{cr}$  η ρωγμή διαδίδεται. Στην κρίσιμη αυτή κατάσταση ο συντελεστής έντασης τάσεων  $K_{eff}$  φθάνει την κρίσιμη τιμή  $K_c$ .

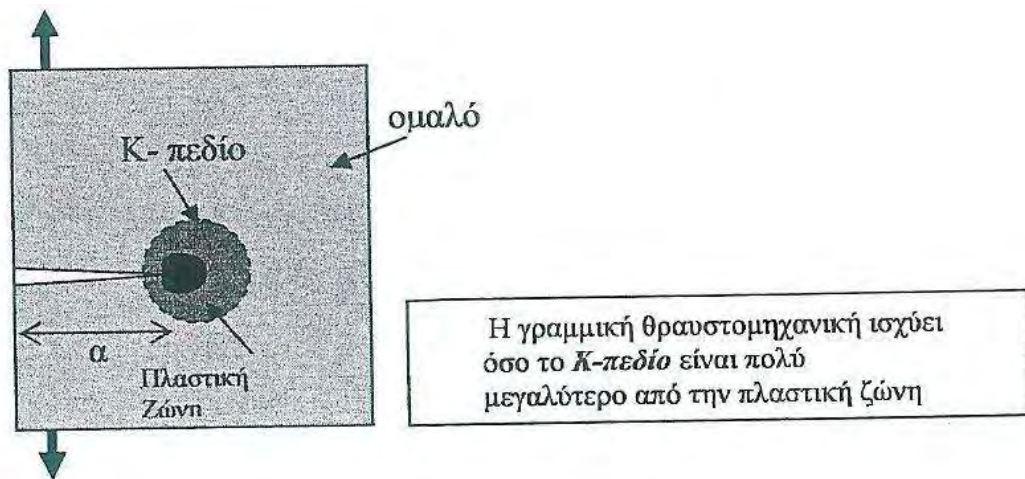
$$K_c = \sigma_{cr} \sqrt{\pi\alpha \left( 1 + \rho \left( \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_F} \right)^2 \right)} \quad (3.14)$$

όπου

$$\rho = \frac{1}{2} \quad (\text{κατά Irwin}) \quad (3.15)$$

$$\rho = \frac{\pi^2}{16} \quad (\text{κατά Dugdale}) \quad (3.16)$$

Η Γραμμική Μηχανική των Θραύσεων (LEFM) αναπτύχθηκε καταρχάς να περιγράψει τα φαινόμενα θραύσης και εξέλιξης ρωγμών σε συνθήκες ελαστικής συμπεριφοράς. Οι περιπτώσεις αυτές είναι πολύ περιορισμένες και συναντώνται όταν η ρωγμή βρίσκεται σε συνθήκες επίπεδης κατάστασης παραμόρφωσης ή σε υλικά με μεγάλη ψαθυρότητα. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι με μικρές τροποποιήσεις η γραμμική θραυστομηχανική μπορεί να εφαρμοστεί και σε υλικά με σχετική ολκιμότητα και για μικρές παραμορφώσεις στη γύρω περιοχή της κορυφής της ρωγμής. Ακριβή όρια ισχύος δεν μπορεί να διατυπωθούν. Ως κανόνας χρησιμοποιείται συνήθως το μέγεθος πλαστικής ζώνης σε σχέση με τις διαστάσεις του ρηγματωμένου σώματος. Για παράδειγμα, τις αρχές της γραμμικής μηχανικής εφαρμόζουμε όσο η πλαστική ζώνη περιορίζεται σε μικρή περιοχή γύρω από την κορυφή της ρωγμής, όσο δηλαδή το πεδίο που επηρεάζεται από τον συντελεστή έντασης (K-πεδίο) είναι πολύ μεγαλύτερο από την πλαστική περιοχή



**Σχήμα 3.3** Περιγραφή πεδίου K και πλαστικής ζώνης

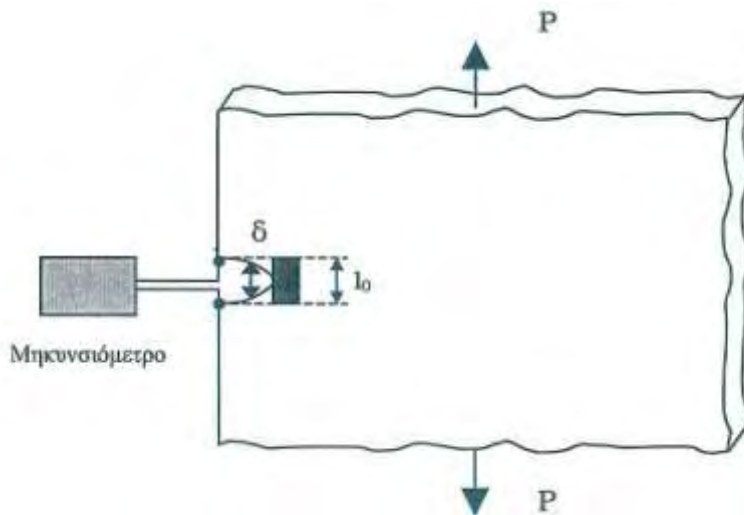
Αν η πλαστική ζώνη είναι πολύ μεγάλη σε σύγκριση με το μήκος ρωγμής ή σε σύγκριση με την απομένουσα διατομή, τότε η γραμμική μηχανική των θραύσεων δεν οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα οπότε χρησιμοποιείται ως κριτήριο αστοχίας η πλαστική ανάλυση με προσδιορισμό του φορτίου κατάρρευσης από πλαστικές παραμορφώσεις ή τις αρχές της μη Γραμμικής Μηχανικής των θραύσεων [4,12,14].

### 3.1.3 Η ιδέα του Crack Opening Displacement (COD)

Η ιδέα Irwin-Orowan το να διερευνάται η συμπεριφορά της ενεργούς ρωγμής μήκους  $a_{eff} = a + r_{πλ}$  αντί της πραγματικής ρωγμής μήκους  $a$  οδηγεί σε ικανοποιητικές προβλέψεις όσο οι πλαστικές παραμορφώσεις γύρω από την ρωγμή είναι μικρές. Για έντονες πλαστικές παραμορφώσεις η χρήση της παραμέτρου του J-ολοκληρώματος ή του ανοίγματος των χειλέων της ρωγμής (COD) οδηγεί σε καλύτερες προβλέψεις συμπεριφοράς της ρωγμής.

Το J-ολοκλήρωμα εκφράζει τον ρυθμό της εκλυόμενης ενέργειας παραμόρφωσης όταν η ρωγμή περιβάλλεται από μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις. Η παράμετρος COD λαμβάνει το άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής ως μέτρο καταπόνησης της ρωγμής.





**Σχήμα 3.4** Πειραματικός προσδιορισμός του  $\delta$

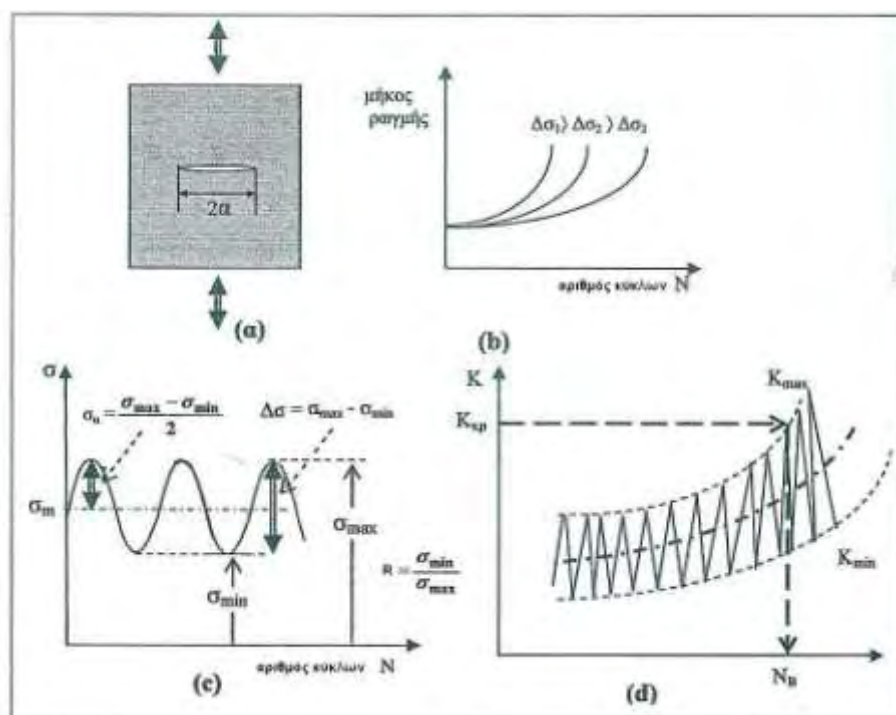
Περισσότερο πρακτική από την παράμετρο  $J$  αποδείχθηκε η χρήση της παραμέτρου  $\delta$ . Μεταξύ της παραμέτρου  $\delta$  και της παραμέτρου  $J$  ισχύει η σχέση:

$$\delta \approx \frac{J}{\sigma_F} \quad \left( \approx \frac{K^2}{E\sigma_F} \text{ για γραμμική συμπεριφορά} \right)$$

όπου  $\sigma_F$  το όριο διαρροής του υλικού [4].

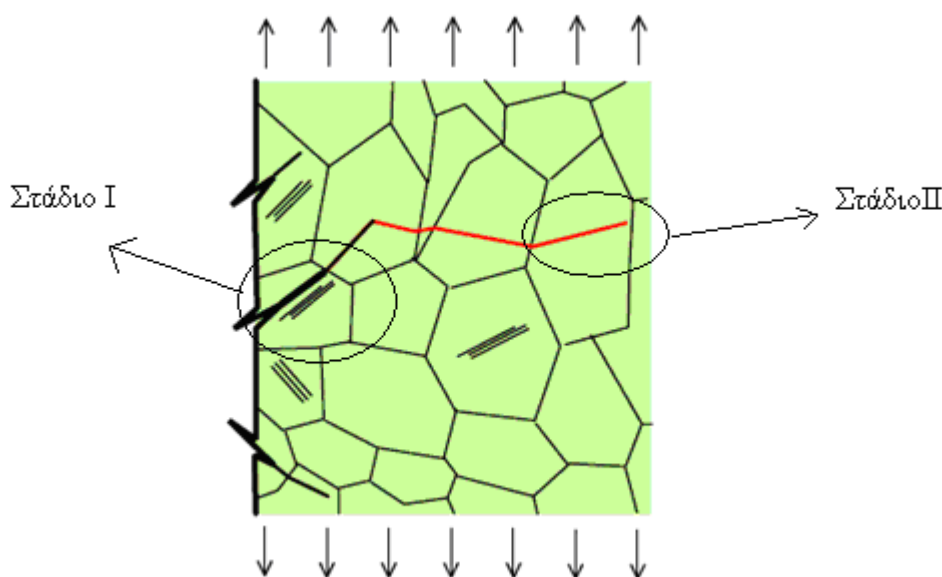
### 3.2 Εξέλιξη ρωγμής σε κόπωση

Η κόπωση (fatigue) είναι φαινόμενο αστοχίας ενός υλικού που οφείλεται σε επαναλαμβανόμενη επιβολή τάσεων ή παραμορφώσεων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η κόπωση έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά. Το πρώτο αφορά στην φόρτιση, η οποία είναι κυκλική, δηλαδή το υλικό υποβάλλεται σε τάσεις ή παραμορφώσεις που μεταβάλλονται μεταξύ μεγίστων και ελαχίστων τιμών. Το δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η «βλάβη», που προκαλείται στο υλικό. Η βλάβη είναι ένας γενικός όρος που μπορεί να αντιστοιχεί σε τοπική πλαστική παραμόρφωση, σχηματισμό μικρορωγμών, καθώς και σχηματισμό και διάδοση μιας κύριας ρωγμής. Η κόπωση προκαλεί την τοπική, προοδευτική συσσώρευση βλάβης στο υλικό, η οποία χαρακτηρίζεται συνήθως από την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Η τελική, γρήγορη θραύση επέρχεται όταν η ρωγμή αποκτήσει ένα κρίσιμο μήκος, έτσι ώστε να ικανοποιείται η κρίσιμη συνθήκη θραύσεως. Έτσι ενώ στη στατική φόρτιση η ικανοποίηση της συνθήκης γίνεται με αύξηση της τάσεως, στην κόπωση η συνθήκη ικανοποιείται με την αύξηση του μήκους της ρωγμής. Σε στατική φόρτιση η αστοχία από θραύση είναι ακαριαία, στην κόπωση η αστοχία απαιτεί χρόνο, έως ότου η ρωγμή αποκτήσει το κρίσιμο μέγεθος. Έτσι στην κόπωση μιλάμε για διάρκεια ζωής του υλικού. Την διάρκεια ζωής την μετράμε σε κύκλους φορτίσεως και την συμβολίζουμε με  $N_f$ .



Σχήμα 3.5 Χαρακτηριστικά κόπωσης σε συνθήκες σταθερού εύρους τάσεων

Στην κόπωση διακρίνουμε δύο φάσεις της διάρκειας ζωής. Η πρώτη φάση αποτελείται από τους κύκλους  $N_i$ , που απαιτούνται για την δημιουργία της μικρορωγμής και διάδοσης της μέχρι ένα μήκος της τάξης μεγέθους μεγαλύτερο από 2-3 διαμέτρους κόκκων. Αυτό είναι το Στάδιο I της συσσώρευσης βλάβης κόπωσης. Η μικρορωγμή δημιουργείται από τα χαρακτηριστικά ολίσθησης σε μικροκλίμακα του υλικού και έχει την διεύθυνση των επιπέδων ολίσθησης. Στο Στάδιο II η ρωγμή έχει μεγαλώσει και διαδίδεται κάθετα στην εφαρμοζόμενη τάση. Εδώ αντιστοιχεί η δεύτερη φάση της διάρκειας ζωής. Η δεύτερη φάση αποτελείται από τους κύκλους  $N_p$ , που απαιτούνται για την διάδοση της ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος αστοχίας. Η διάρκεια ζωής είναι επομένως το άθροισμα των φάσεων  $N_i$ ,  $N_p$  ( $N_f = N_i + N_p$ ). Τα στάδια I και II συσσώρευσης βλάβης στην κόπωση φαίνονται στο **Σχήμα 3.6**



**Σχήμα 3.6** Στάδιο I και II στάδιο εξέλιξης της βλάβης, κάτω από συνθήκες κόπωσης χαμηλής συχνότητας

Στο σημείο αυτό είναι καλό να διακρίνουμε δύο μεθοδολογίες που αφορούν την ανάλυση και τον σχεδιασμό για την διαχείριση της κόπωσης στις κατασκευές. Σε ελαφρές, σύνθετες κατασκευές, όπως αεροναυπηγικές κατασκευές, δεχόμαστε ότι προϋπάρχουν ρωγμές με μήκος τουλάχιστον ίσο με το όριο ανίχνευσης των μη καταστρεπτικών μεθόδων (NDT). Στην περίπτωση αυτή  $N_i=0$  και η διάρκεια ζωής είναι οι κύκλοι φορτίσεως για την ανάπτυξη της προϋπάρχουσας ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος. Αυτές οι κατασκευές σχεδιάζονται σύμφωνα με τη μεθοδολογία ανοχής

στην βλάβη (damage tolerance ή defect tolerance). Αντίθετα, σε κατασκευαστικά στοιχεία όπως αυτά των μηχανών (άξονες, οδοντώσεις, έδρανα κύλισης κλπ.), θεωρούμε ότι δεν προϋπάρχουν ρωγμές (damage free ή defect free). Στην περίπτωση αυτή το  $N_i$  μπορεί να είναι ένα μεγάλο ποσοστό του  $N_f$ . Το  $N_i$  αυξάνεται όσο μειώνεται το μέγεθος των επιβαλλόμενων κυκλικών φορτίων και εξαρτάται από την κατάσταση της επιφάνειας του υλικού. Σε πολύ λεία δοκίμια το  $N_i$  μπορεί να αποτελεί έως και το 90% της διάρκειας ζωής, ενώ σε διαβρωμένα δοκίμια, ή σε δοκίμια που έχουν επιφανειακές εγχοπές και γενικότερα σημεία συγκεντρώσεως των τάσεων, το  $N_i$  μπορεί να είναι μόλις το 10% της διάρκειας ζωής. Παρακάτω θα περιγράψουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που αφορούν την κόπωση με προϋπάρχουσα ρωγμή.

Η διάρκεια ζωής ενός κατασκευαστικού στοιχείου που υποβάλλεται σε κυκλική φόρτιση αποτελείται από την φάση του σχηματισμού ρωγμής και την φάση της ανάπτυξεως της ρωγμής. Στην περίπτωση που προϋπάρχει ρωγμή η διάρκεια ζωής αποτελείται από τους κύκλους φορτίσεως που απαιτούνται για την εξέλιξη μίας κύριας ρωγμής στο κρίσιμο μέγεθος  $a = a_{cr}$ , όπου  $a_{cr}$  το κρίσιμο μήκος ρωγμής για αστοχία. Τότε ισχύει:  $N_f = N_p$ . Η κυκλική φόρτιση εκφράζεται από το εύρος:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (3.17)$$

$$K_{max} = Q\sigma_{max} \sqrt{\pi a} \quad (3.18)$$

$$K_{min} = Q\sigma_{min} \sqrt{\pi a} \quad (3.19)$$

όπου  $K_{max}$  και  $K_{min}$  ο μέγιστος και ο ελάχιστος συντελεστής έντασης των τάσεων κατά την διάρκεια του κύκλου αντίστοιχα. Το εύρος συντελεστή έντασης τάσης,  $\Delta K$ , αυξάνει με τον χρόνο διότι αυξάνεται το μήκος του ρήγματος.

Στα περισσότερα μεταλλικά κράματα η εξάρτηση του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής με το εύρος  $\Delta K$  εκφράζεται με μία σιγμοειδή καμπύλη σε διπλή λογαριθμική κλίμακα, στην οποία διακρίνονται τρεις περιοχές, Α, Β και Γ, όπως φαίνεται στο

### Διάγραμμα 3.1

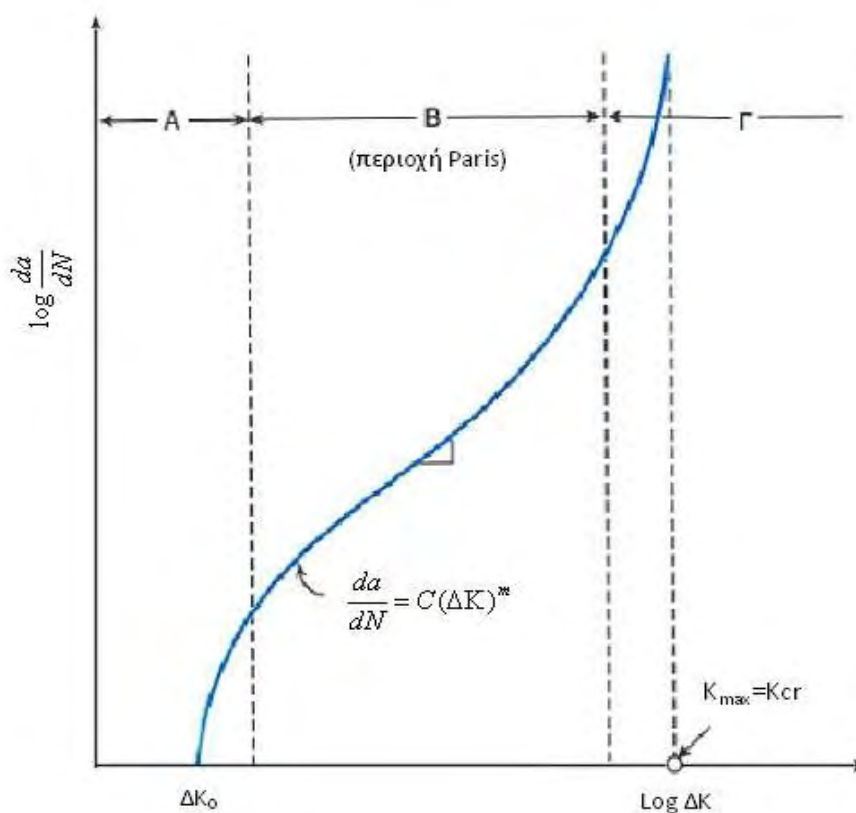
- Περιοχή Α: για χαμηλές τιμές του  $\Delta K$ , μικρότερες από το κατώφλι  $\Delta K_0$ , η ανάπτυξη της ρωγμής είναι εξαιρετικά αργή, μικρότερη από μία πλεγματική σταθερά ανά κύκλο, ώστε να θεωρείται ότι η ρωγμή δεν αναπτύσσεται.

- Περιοχή Β: στην περιοχή αυτή, που είναι γνωστή ως η περιοχή Paris, η ρωγμή αναπτύσσεται σταθερά κάτω από την επενέργεια του  $\Delta K$ . Στην περιοχή αυτή η σχέση μεταξύ του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής  $da/dN$  και του εύρους συντελεστή έντασης τάσης  $\Delta K$  είναι:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.20)$$

όπου τα  $C$  και  $n$  είναι σταθερές του υλικού και εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, τη μικροδομή, το περιβάλλον λειτουργίας και τον λόγο των τάσεων  $R$ . Η σταθερά  $n$  κυμαίνεται μεταξύ 2 και 4.

- Περιοχή Γ: στην περιοχή αυτή το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων είναι πολύ μεγάλο και η ρωγμή αναπτύσσεται ταχύτατα μέχρι την τελική γρήγορη θραύση όταν ο μέγιστος συντελεστής έντασης των τάσεων  $K_{\max}$  προσεγγίσει την κρίσιμη τιμή του συντελεστή έντασης των τάσεων  $K_{cr}$  [4,12,14,15].



**Διάγραμμα 3.1** Ταχύτητα αναπτύξεως της ρωγμής  $da/dN$  σε συνάρτηση με το εύρος του συντελεστή εντάσεως των τάσεων  $\Delta K$

### 3.3 Μεθοδολογίες πρόβλεψης ρωγμής κόπωσης υπό σταθερό εύρος τάσεων

Τις τελευταίες δεκαετίες η έρευνα στην Μηχανική των Θραύσεων οδήγησε σε πολύ σημαντικά αποτελέσματα όσον αφορά στην ανάπτυξη μεθοδολογιών και κωδικών για την πρόβλεψη της εξέλιξης ρωγμών, καθώς και της υποβάθμισης της αντοχής και της διάρκειας ζωής κατασκευαστικών στοιχείων σε συνθήκες κόπωσης. Οι περισσότεροι κανόνες στηρίζονται στην βασική φιλοσοφία, ότι ο ρυθμός εξέλιξης μιας ρωγμής ( $da/dN$ ) εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβολής των συντελεστών έντασης ( $\Delta K$ ) στην κορυφή της ρωγμής και χρησιμοποιούν κανόνες της μορφής:

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K_R) \quad (\text{όπου } R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}) \quad (3.21)$$

όπου  $da/dN$  ο ρυθμός εξέλιξης της ρωγμής και

$$\Delta K = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.22)$$

η μεταβολή του συντελεστή έντασης των τάσεων στην κορυφή της ρωγμής.

Ο πιο απλός κανόνας είναι ο νόμος του Paris:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (3.23)$$

όπου  $C$  και  $n$  είναι σταθερές που καθορίζονται από πειράματα κόπωσης σε ρηγματωμένα δοκίμια. Ο εμπειρικός αυτός νόμος στηρίζεται στην γραμμική θραυστομηχανική. Με ολοκλήρωση της εξ. (3.21) μεταξύ  $N=0$  και  $N$  προκύπτει το μήκος στο οποίο έχει εξελιχθεί μια αρχική ρωγμή μήκους  $a_0$  μετά από  $N$ -κύκλους καταπόνησης:

$$a(N) = a_0 + \int_{N=0}^N f(\Delta K) dN \quad (3.24)$$

Συνήθως η ολοκλήρωση γίνεται αριθμητικά γιατί οι διαδικασίες εξέλιξης της ρωγμής είναι πολύπλοκοι και ο συντελεστής  $\beta$  στην εξίσωση (3.22) δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος της ρωγμής.

Αρκετές εμπειρικές σχέσεις, παραλλαγές του νόμου του Paris, έχουν αναφερθεί στη βιβλιογραφία οι οποίες περιγράφουν την συμπεριφορά της διάδοσης μιας ρωγμής κάτω από την επιβολή ενός δυναμικού φορτίου σταθερού εύρους τάσεων, συναρτήσει των κύκλων φόρτισης. Ανάμεσα σε αυτές τις σχέσεις, οι πιο γνωστές και ευρύτερα εφαρμόσιμες (σε περιπτώσεις βιομηχανικού σχεδιασμού) είναι οι εμπειρικές σχέσεις του Forman, Kearney & Engle (1967) και Walker (1970):

$$\frac{da}{dN} = C_a \left\{ \frac{\Delta K^{m_a}}{(1-R)K_c - \Delta K} \right\} \quad (3.25)$$

και

$$\frac{da}{dN} = C_b \left\{ \frac{\Delta K^{m_b}}{(1-R)^{c_1}} \right\} \quad (3.26)$$

όπου  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $m_a$  και  $c_1$  είναι τύπου Paris εμπειρικές σταθερές του υλικού. Αυτές οι εξισώσεις δεν λαμβάνουν υπόψη τυχόν επιδράσεις της μικροδομής ή του περιβάλλοντος [4,12,14,15].

### 3.4 Μοντέλο πρόβλεψης εξέλιξης ρωγμής LTSM-F

Για την υποστήριξη του σχεδιασμού με βάση την φιλοσοφία της ανοχής στη βλάβη έχουν αναπτυχθεί διάφορα μοντέλα εξέλιξης ρωγμών και κώδικες πρόβλεψης. Τα περισσότερα μοντέλα αναφέρονται σε μια κυρίαρχη ρωγμή και θεωρούν ότι η ρωγμή (βλάβη) συσσωρεύεται ανά κύκλο καταπόνησης, για εκατομμύρια εναλλαγές φορτίων μέχρι την οριστική αστοχία. Ιδιαίτερη προσοχή έχει δοθεί στην επίδραση της αλληλουχίας των φορτίων και στα φαινόμενα υπερφόρτισης, τα οποία συνδέονται άμεσα με επιταχύνσεις/επιβραδύνσεις του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής, λόγω ανάπτυξης πλαστικών παραμορφώσεων και θλιπτικών τάσεων. Η χρήση των μοντέλων αυτών γενικά είναι απλή και η πρόβλεψη τους ικανοποιητική, και γι' αυτό βρίσκουν ευρεία εφαρμογή. Κατά τον σχεδιασμό όμως η αξιοπιστία τους εξαρτάται από την ειδική περίπτωση, έτσι ώστε να μην υπάρχει ακόμη και σήμερα ένα γενικά αποδεκτό εργαλείο πρόβλεψης της διάρκειας ζωής γιατί τα φαινόμενα εξέλιξης ρωγμών είναι περίπλοκα, η αξιοπιστία των μοντέλων εξαρτάται από μια σειρά παραμέτρων, η επιλογή των οποίων παίζει σημαντικό ρόλο στο αποτέλεσμα. Για τους παραπάνω λόγους, ακόμη και σήμερα στην αεροναυπηγική δεν δίνεται έγκριση για την λειτουργία αν το νέο αεροσκάφος ή τροποποιημένο εξάρτημα ενός υπάρχοντος αεροσκάφους δεν ελεγχθεί σε δοκιμές πλήρους κλίμακας.

Να αναφέρουμε ότι η πραγματική καταπόνηση κόπωσης των αεροπορικών εξαρτημάτων δεν αποτελείται συνήθως από πλήρεις επαναλαμβανόμενους κύκλους αλλά από τυχαία γεγονότα κόπωσης. Από την άλλη όλοι οι κανόνες εξέλιξης της ρωγμής υποθέτουν την ύπαρξη φόρτισης με πλήρεις κύκλους κόπωσης. Για τον λόγο αυτό οι κώδικες υπολογισμού της διάρκειας ζωής περιλαμβάνουν κανόνες για την μετατροπή των τυχαίων γεγονότων κόπωσης σε αλληλουχία πλήρων κύκλων κόπωσης (π.χ. μέθοδος Rainflow, Range-pair, ισοδύναμου ΔK, root mean square κτλ.).

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα κάνουμε μια αναφορά στο μοντέλο LTSM-F [7] και τις βασικές αρχές που χρησιμοποιεί. Το μοντέλο αυτό, κάνει τη παραδοχή ότι η εξέλιξη της ρωγμής γίνεται βηματικά. Η αύξηση του μήκους ρωγμής κατά  $\omega_s$  αντιστοιχεί σε θραύση του στοιχειώδους όγκου του υλικού μήκους  $\omega_s$  στο άκρο της ρωγμής. Επίσης, το μοντέλο μπορεί να εκτιμήσει και την επίδραση που θα έχει η παρουσία μίας υπερφόρτισης σε ένα ιστορικό φόρτισης σταθερού εύρους τάσεων η

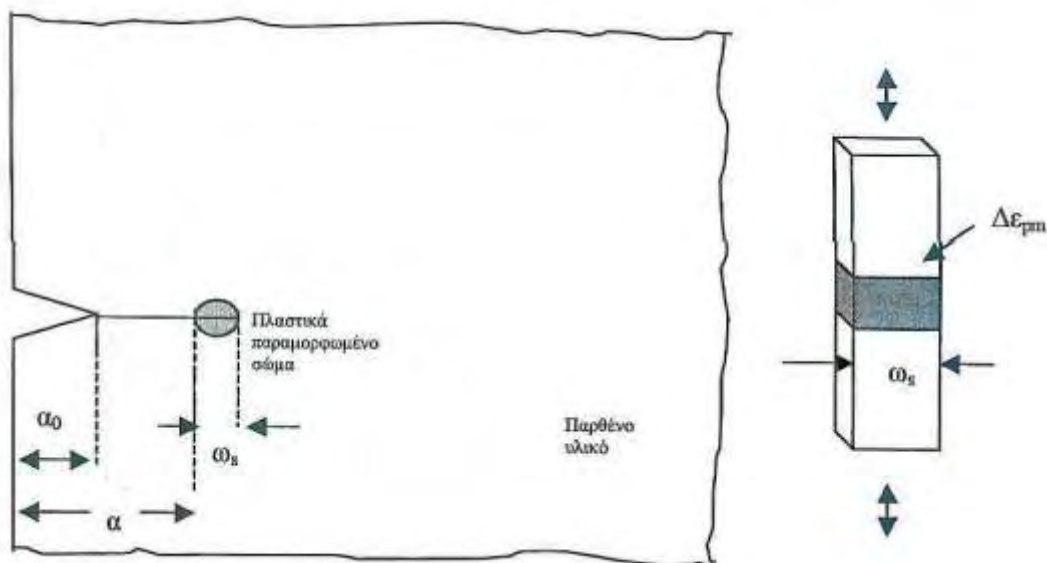


οποία έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία πλαστικής ζώνης μήκους  $\omega_o$  μπροστά από την αιχμή της ρωγμής. Παρακάτω, θα εστιάσουμε την ανάλυση μας μόνο στο τμήμα του μοντέλου που αφορά την εξέλιξη της ρωγμής σε φόρτιση σταθερού εύρους τάσεων χωρίς να κάνουμε περαιτέρω αναφορά σε ότι αφορά τις υπερφορτίσεις. Η αστοχία του υλικού στοιχείου μήκους  $\omega_s$  λαμβάνει χώρα μετά από ένα κρίσιμο αριθμό κύκλων φόρτισης  $\Delta N$ . Η ταχύτητα εξέλιξης της ρωγμής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{da}{dN} = \frac{\omega_s}{\Delta N} \quad (3.27)$$

όπου

$$\omega_s = \frac{\pi}{32} \left( \frac{\Delta K}{\sigma_F} \right)^2 \quad (3.28)$$



**Σχήμα 3.7** Στοιχειώδης όγκος υλικού μήκους  $\omega_s$  στο άκρο της ρωγμής

Για τον υπολογισμό του κρίσιμου αριθμού κύκλων  $\Delta N$  γίνεται η παραδοχή ότι το υλικό στοιχείο μήκους  $\omega_s$  στο άκρο της ρωγμής υποβάλλεται σε συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης με εύρος πλαστικής παραμόρφωσης  $\Delta \epsilon_{pm}$ . Ο αριθμός κύκλων που απαιτείται για την αστοχία του υλικού στοιχείου  $\omega_s$  μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση Coffin-Manson για την ολιγοκυκλική κόπωση:

$$\Delta \varepsilon_{pm} (\Delta N)^m = 2 \varepsilon_f' \quad (3.29)$$

όπου ε<sub>f</sub>' ο συντελεστής ολκιμότητας που μπορεί να ληφθεί ίσος με την παραμόρφωση θραύσης του υλικού και m εμπειρική παράμετρος (απόλυτη τιμή του εκθέτη ολκιμότητας) η οποία για τα μεταλλικά υλικά λαμβάνει τιμές από 0.5-0.7. Η τιμή Δε<sub>pm</sub> μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης:

$$\Delta \varepsilon_{pm} = \frac{1}{\omega_s} \int_0^{\omega_s} \Delta \varepsilon_p(x) dx \quad (3.30)$$

Η κατανομή της πλαστικής παραμόρφωσης Δε<sub>p</sub>(x) στο μήκος ω<sub>s</sub> δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \varepsilon_{p(x)} = \Delta \delta g \left( \frac{x}{\omega_s} \right) \quad (3.31)$$

Η τιμή Δε<sub>pm</sub> της εξ. (3.30) αντιστοιχεί στην μέση πλαστική παραμόρφωση του υλικού στοιχείου ω<sub>s</sub> που υποβάλλεται σε ολιγοκυκλική κόπωση. Λαμβάνοντας υπόψη τον διαφορετικό βαθμό πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται ο στοιχειώδης όγκος υλικού σε μήκος ω<sub>s</sub> κατά την ολιγοκυκλική κόπωση:

$$\Delta \varepsilon_{pm} = \frac{1}{\omega_s^\beta} \int_0^{\omega_s} \Delta \varepsilon_p(x) dx \quad (3.32)$$

Το άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής (Crack Opening Displacement) για την περίπτωση κόπωσης σταθερού εύρους τάσεων δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta \delta = \frac{(\Delta K)^2}{2E\sigma_F} \quad (3.33)$$

Με την βοήθεια των εξ. (3.31), (3.32), (3.33) προκύπτει η τιμή για το εύρος πλαστικής παραμόρφωσης:

$$\Delta \varepsilon_{pm} = \frac{1}{\omega_s^{\beta-1}} \frac{(\Delta K)^2}{2E\sigma_F} I \quad (3.34)$$

όπου  $I = \int_0^1 g(\xi) d\xi$  και  $\xi = x / \omega$ . Για την συνθήκη  $\Delta \varepsilon_{pm} = \varepsilon_f$  όπου  $\varepsilon_f$  η

παραμόρφωση θραύσης του υλικού από το πείραμα του εφελκυσμού, η τιμή  $\Delta \varepsilon_{pm}$  από την εξ. (3.34) αντιστοιχεί στην μέση πλαστική παραμόρφωση του στοιχειώδους όγκου υλικού στο άκρο της ρωγμής που υποβάλλεται σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Τότε το εύρος του συντελεστή έντασης τάσεων  $\Delta K$  γίνεται ίσο με τον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσεων του υλικού  $K_{cr}$ . Μετά από υπολογισμούς προκύπτει:

$$\Delta \varepsilon_{pm} = \frac{A}{\omega_s^{\beta-1}} \frac{(\Delta K)^2}{K_{cr}} \varepsilon_f \quad (3.35)$$

όπου  $A$  σταθερά. Ο αριθμός κύκλων  $\Delta N$  μπορεί να υπολογισθεί με την βοήθεια των εξ. (3.29) και (3.35):

$$\Delta N = \left( \frac{2\omega_s^{\beta-1}}{A} \right)^{1/m} \left( \frac{K_{cr}}{\Delta K} \right)^{2/m} \quad (3.36)$$

Με αντικατάσταση των εξ. (3.28) και (3.36) στην εξ. (3.27) προκύπτει η εξίσωση ταχύτητας εξέλιξης ρωγμής:

$$\frac{d\alpha}{dN} = \left( \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{2}K_{cr}} \right)^{2/m} \left( \frac{\pi}{32\sigma_f^2} \right)^{1-\frac{\beta-1}{m}} \Delta K^{2(1-\frac{\beta-2}{m})} \quad (3.37)$$

Στην εξίσωση (3.37) οι ποσότητες

$$C = \left( \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{2}K_{cr}} \right)^{2/m} \left( \frac{\pi}{32\sigma_f^2} \right)^{1-\frac{\beta-1}{m}} \quad (3.38)$$

και

$$n = 2 \left( 1 - \frac{\beta-2}{m} \right) \quad (3.39)$$

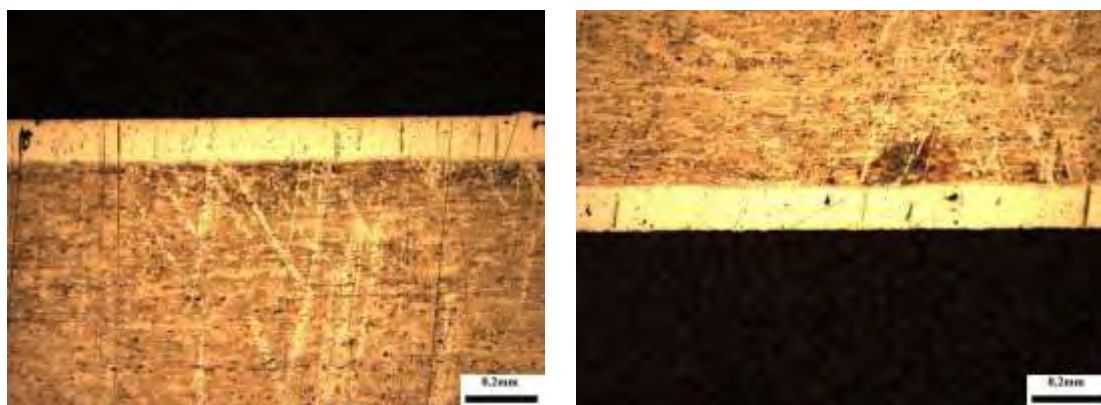
είναι σταθερές και εξαρτώνται από το υλικό και τον λόγο τάσεων  $R$ . Η εξίσωση (3.37) με χρήση των εξισώσεων (3.38) και (3.39) έχει την ίδια μορφή με τον νόμο του Paris αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής υπό σταθερό εύρος τάσεων λαμβάνοντας υπόψη τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού όπως το όριο διαρροής  $\sigma_y$  και τον κρίσιμο συντελεστή έντασης τάσης  $K_{cr}$ . Οι μηχανικές ιδιότητες λαμβάνονται υπόψη μέσω της σχέσης (3.38) και καθορίζουν την τιμή του συντελεστή  $A$  που είναι πειραματική σταθερά.

Το μοντέλο LTSM-F χρησιμοποιείται με βάση αυτή την φιλοσοφία στην παρούσα εργασία για την πρόβλεψη της εξέλιξης ρωγμής σε κράμα αλουμινίου Alclad 2024-T3 α) σε υλικό αναφοράς και β) σε υλικό που έχει υποστεί ειδική θερμική κατεργασία που οδηγεί σε τοπική μεταβολή του ορίου διαρροής μπροστά από την ρωγμή. Η επίδραση της μεταβολής του ορίου διαρροής λαμβάνεται υπόψη στην πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής μέσω των εξισώσεων (3.37) και (3.38) στο μοντέλο LTSM-F. Ο υπολογισμός της αύξησης του μήκους ρωγμής σε κόπωση γίνεται μέσω της σχέσης (3.37) [4].

## 4. Πειραματική Διαδικασία

### 4.1 Υλικό

Για την πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε αεροναυπηγικό κράμα αλουμινίου Alclad 2024 σε θερμική κατεργασία T3. Το πάχος του ελάσματος ήταν 3.2mm. Η επικάλυψη καθαρού Αλουμινίου (clad) ήταν πάχους 0.125mm. Το υλικό διατέθηκε για τις ανάγκες της εργασίας από το εργαστήριο Τεχνολογίας και Αντοχής Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών.



**Εικόνα 4.1** Κράμα Alclad 2024-T3, παρατήρηση με οπτικό μικροσκόπιο

### 4.2 Μελέτη της επίδρασης του ορίου διαρροής στην συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής του 2024

#### 4.2.1 Επιλογή θερμικών κατεργασιών για την μεταβολή του ορίου διαρροής

##### 4.2.1.1 Ομοιόμορφη μεταβολή του ορίου διαρροής (Θερμική κατεργασία ΘΚ1)

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2 η επιλογή κατάλληλης θερμικής κατεργασίας που δημιουργεί συνθήκες υπεργήρανσης στο υλικό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της αντοχής του υλικού. Η θερμική κατεργασία εξαρτάται από την τιμή της θερμοκρασίας και τον χρόνο έκθεσης του υλικού σε αυτήν. Για την μελέτη των συνθηκών υπεργήρανσης του κράματος Alclad 2024-T3 και την

ομοιόμορφη υποβάθμιση του ορίου διαρροής του σε σχέση με το υλικό αναφοράς, αρχικά εξετάστηκε η συμπεριφορά του υλικού όταν αυτό εκτεθεί σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, κάτω από την καμπύλη solvus (540°C) και την θερμοκρασία ανόπτησης (413°C) για συγκεκριμένο χρόνο (από 2 έως 48 ώρες) . Με τον τρόπο αυτό, δημιουργήθηκαν καμπύλες υπεργήρανσης σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Με βάση τις καμπύλες παρατηρήθηκε ότι αν το υλικό εκτεθεί στην θερμοκρασία 250 °C και 300 °C, για 15 ώρες, επιτυγχάνεται μια πτώση της σκληρότητας και αντίστοιχα του ορίου διαρροής της τάξης του 30% και 50-60% αντίστοιχα.

Για τη δημιουργία των καμπυλών υπεργήρανσης, κόπηκαν μικρά δοκίμια διαστάσεων 1x1mm<sup>2</sup>. Στη συνέχεια, τα δοκίμια αυτά τοποθετήθηκαν σε ειδικό φούρνο ειδικών θερμοκρασιών της Thermawatt TGT 50 ισχύος 0.7kW στο Εργαστήριο Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η κατεργασία έγινε σε θερμοκρασίες 150,190,200,220,250,260,300°C, για χρόνους 2,6,10,15,24,48 ώρες. Για τον έλεγχο της μεταβολής της σκληρότητας μετά τις θερμικές κατεργασίες, έγιναν σκληρομετρήσεις των δοκιμίων. Για τα αποτελέσματα σκληρομετρήσεων των δοκιμίων γίνεται εκτενέστερη αναφορά παρακάτω στο αντίστοιχο υποκεφάλαιο. Τα διαγράμματα υπεργήρανσης που δημιουργήθηκαν παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5 με τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

Στον ειδικό φούρνο θερμικών κατεργασιών Thermawatt TGM 3262 ισχύος 3kW του εργαστηρίου Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, εκτέθηκαν εκτός από τα δοκίμια σκληρότητας και δοκίμια εξέλιξης ρωγμής και δυσθραυστότητας C(T) που κόπηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές E647-00 και E561-98 αντίστοιχα. Τα δοκίμια εκτέθηκαν σε θερμοκρασία 250°C ή 300°C για 15 ώρες με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της μείωσης του ορίου διαρροής σε διάδοση ρωγμής λόγω κόπωσης και η μεταβολή της δυσθραυστότητας του υλικού.



**Εικόνα 4.2** Δοκιμή θερμικής κατεργασίας σε κάθετο φούρνο Thermawatt TGT 50



**Εικόνα 4.3** Φούρνος όπου έγινε θερμική κατεργασία υπεργήρανσης δοκιμίων C(T)

#### *4.2.1.2 Γραμμική μεταβολή του ορίου διαρροής (Θερμική κατεργασία ΘΚ2)*

Για την επίτευξη γραμμικής μεταβολής (βαθμίδας) του ορίου διαρροής λόγω υπεργήρανσης στο κράμα Alclad 2024-T3, η πειραματική διαδικασία ήταν πιο σύνθετη. Συγκεκριμένα μια τέτοιου είδους θερμική κατεργασία προϋποθέτει την έκθεση του υλικού σε θερμοκρασιακό περιβάλλον με βαθμιαία μεταβαλλόμενη

θερμοκρασία, πράγμα που δεν μπορεί να επιτευχθεί με τους κλασσικούς φούρνους κατεργασιών.

Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκε και χρησιμοποιήθηκε ειδική ιδιοσυσκευή. Η φιλοσοφία λειτουργίας της ιδιοσυσκευής είναι η εξής:

Σε ένα κομμάτι ελάσματος το οποίο είναι καλά μονωμένο σε όλη του την επιφάνεια, επιβλήθηκαν στα 2 άκρα του με ελεγχόμενο τρόπο σταθερές τιμές θερμοκρασίας, σύμφωνα με τον βασικό νόμο μεταφοράς θερμότητας (νόμος Fourier). Έτσι επιτεύχθηκε επιτυγχάνεται μια γραμμική μεταβολή της θερμοκρασίας κατά μήκος του μονωμένου υλικού ανάμεσα στις τιμές των σταθερών θερμοκρασιών.

Η ιδιοσυσκευή αποτελούνταν από 2 δεξαμενές διαστάσεων 150x150x250mm (μήκος x πλάτος x ύψος) οι οποίες στη μία τους πλευρά είχαν μια εσοχή ώστε να μπορεί τμήμα του υλικού να εφαρμόσει εκεί όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 4.4**. Η εσοχή είχε βάθος 50mm και ήταν πλήρως στεγανοποιημένη στο εσωτερικό της δεξαμενής. Στις δεξαμενές τοποθετήθηκε ειδικό βιομηχανικό λάδι ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες (υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης).



**Εικόνα 4.4** Δεξαμενή λαδιού

Τμήματα του ελάσματος με διαστάσεις 150mmx100mm χρησιμοποιήθηκαν για τις θερμικές κατεργασίες ΘΚ2 όπως φαίνονται και στην **Εικόνα 4.5**. Τα 2 άκρα των ελασμάτων με μήκος 50mm τοποθετήθηκαν στην εσοχή των 2 δεξαμενών που ήταν γεμάτες με λάδι υψηλών θερμοκρασιών. Το λάδι θερμαίνονταν με 2



αντιστάσεις που ήταν εμβαπτισμένες μέσα στις δεξαμενές. Λόγω της ομοιόμορφης θέρμανσης του λαδιού από τις αντιστάσεις, το μήκο υλικού των 50mm που βρίσκονταν στο εσωτερικό των δεξαμενών ήταν αρκετό ώστε να αναπτυχθούν σταθερές θερμοκρασιακές συνθήκες στο σημείο όπου το υλικό έτεμνε το τοίχωμα της κάθε δεξαμενής. Το τμήμα του υλικού το οποίο παρέμενε εκτός των 2 δεξαμενών είχε μονωθεί εξωτερικά με πετροβάμβακα ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θερμότητας προς το περιβάλλον. Επίσης, με πετροβάμβακα καλύφθηκαν και οι υπόλοιπες επιφάνειες των δεξαμενών ώστε να μην υπάρχουν μεγάλες απώλειες της θερμότητας του λαδιού και να μπορούμε να έχουμε ομοιόμορφη θερμοκρασία σε όλο τον όγκο του λαδιού.

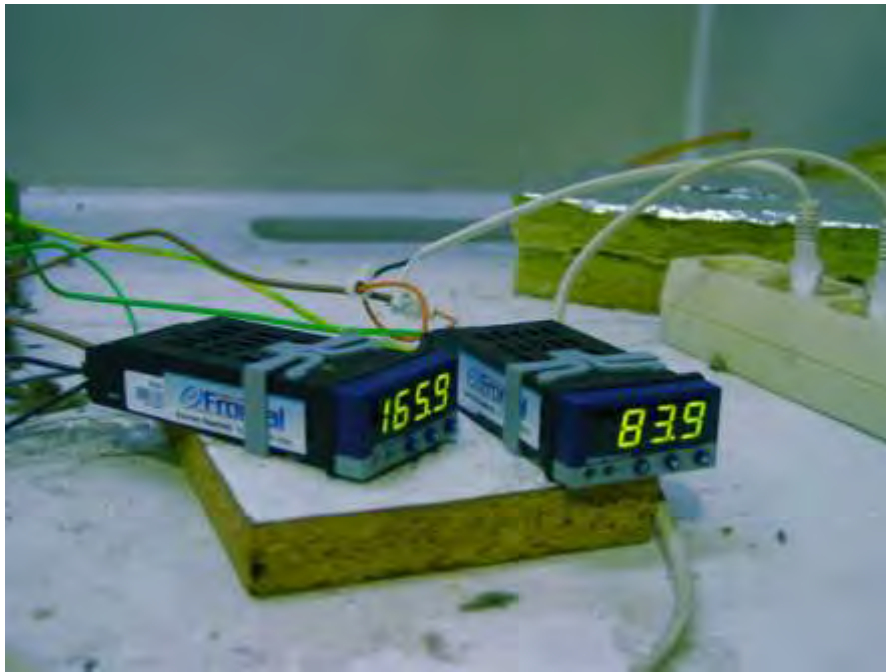


**Εικόνα 4.5** Δοκίμιο με μεταβαλλόμενο όριο διαρροής



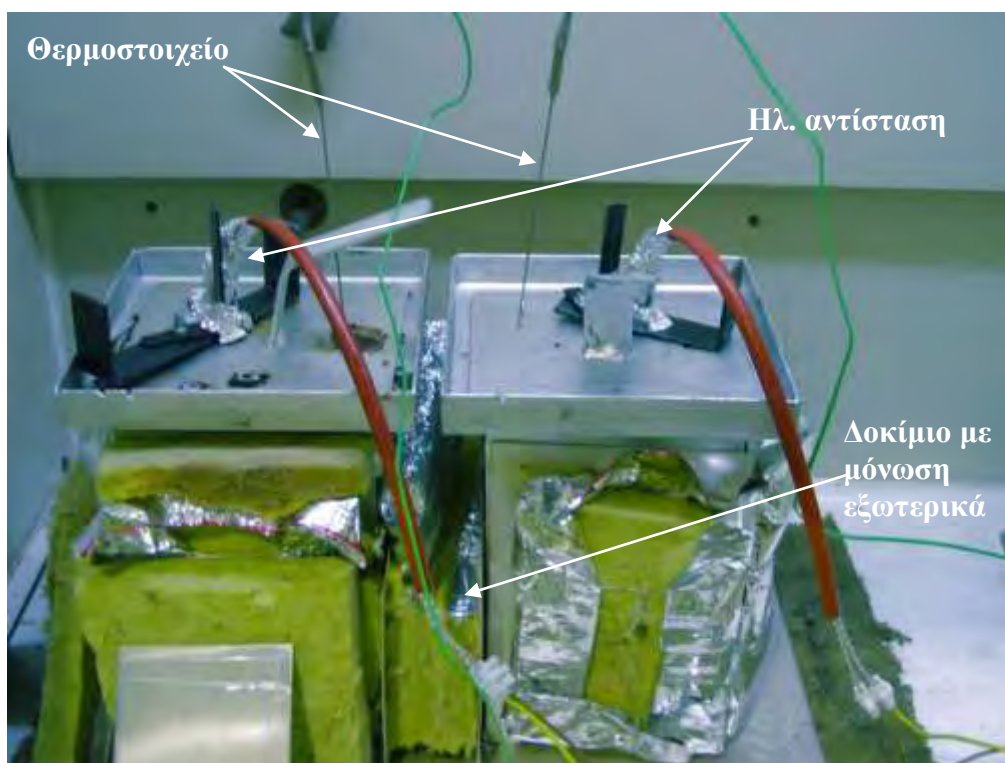
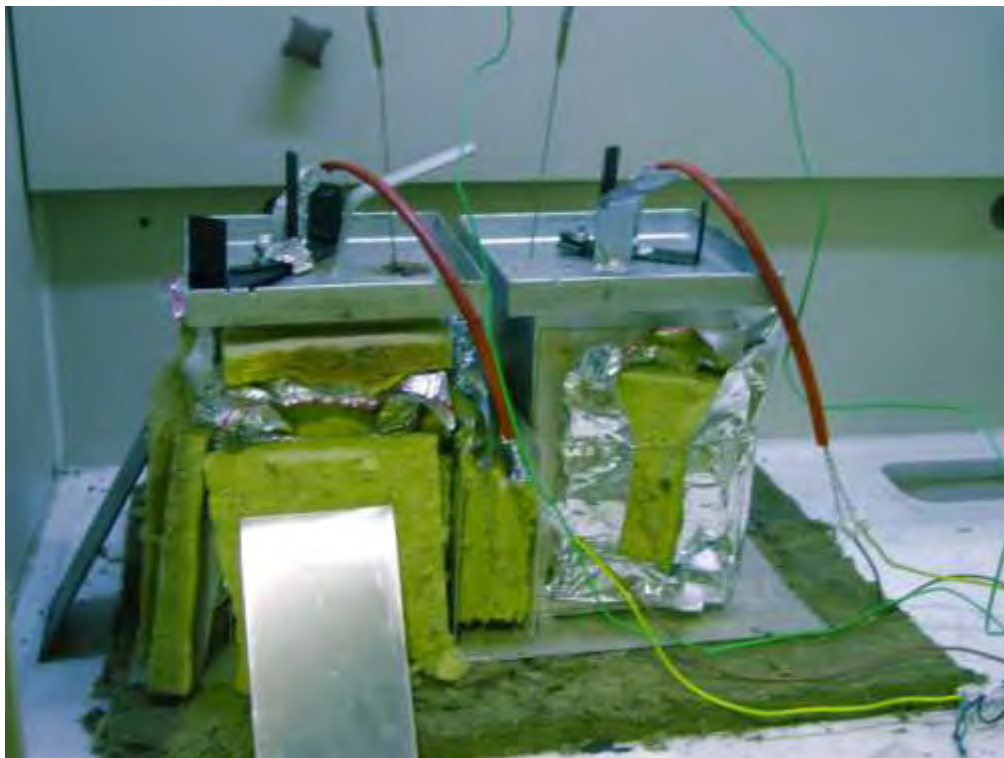
**Εικόνα 4.6** Μόνωση δοκιμίου και τοποθέτηση θερμοστοιχείου για έλεγχο της θερμοκρασίας κατά την πειραματική διαδικασία

Για την θέρμανση του λαδιού χρησιμοποιήθηκαν 2 πλήρως στεγανοποιημένες αντιστάσεις 0,5 KWatt οι οποίες ήταν εμβαπτισμένες στο λάδι των δεξαμενών. Η θερμοκρασία του λαδιού ρυθμιζόταν μέσω ειδικών controllers τύπου Jumo iTron32 και ελέγχονταν με θερμοστοιχεία τοποθετημένα μέσα στη δεξαμενή καθώς και σε συγκεκριμένα σημεία μέσα στο έλασμα. Για την υποβάθμιση των τιμών σκληρότητας και ορίου διαρροής, χρησιμοποιήθηκαν τα διαγράμματα υπεργήρανσης που κατασκευάστηκαν και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 5. Σύμφωνα με αυτά, οι θερμοκρασίες του λαδιού των 2 δεξαμενών ήταν 300°C και 200 °C. Στο δοκίμιο είχε τοποθετηθεί ένα θερμοστοιχείο ακριβώς στην έξοδο της δεξαμενής με θερμοκρασία λαδιού στους 300 °C και άλλο ένα στο κέντρο ακριβώς του ελεύθερου τμήματος του ελάσματος ώστε κατά τη διάρκεια της θερμικής κατεργασίας να παρακολουθείται ανά πάσα στιγμή η θερμοκρασία του δοκιμίου.



**Εικόνα 4.7** Controllers θερμοκρασίας

Το μήκος ελάσματος στο οποίο δημιουργήθηκε η μεταβολή, ανάμεσα στις 2 δεξαμενές, ήταν 50mm. Μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας, τμήμα του ελάσματος χρησιμοποιήθηκε για μικροσκληρομέτρηση και το υπόλοιπο για την δημιουργία δοκιμίων κόπωσης.



**Εικόνα 4.8** Πειραματική διαδικασία σε εξέλιξη

#### 4.2.2 Μηχανικές Ιδιότητες

Μετά από τις θερμικές κατεργασίες για την επίτευξη ομοιόμορφης και γραμμικής μεταβολής του ορίου διαρροής, μελετήθηκε πειραματικά η μηχανική συμπεριφορά του υλικού. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας και δοκιμές εφελκυσμού που παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο. Επίσης, για την μελέτη της επίδραση του ορίου διαρροής στη συμπεριφορά θραύσης του υλικού πραγματοποιήθηκαν δοκιμές δυσθραυστότητας και δοκιμές εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση τόσο στο αρχικό υλικό όσο και σε υλικό που είχε υποστεί θερμική κατεργασία ΘΚ1 και ΘΚ2.

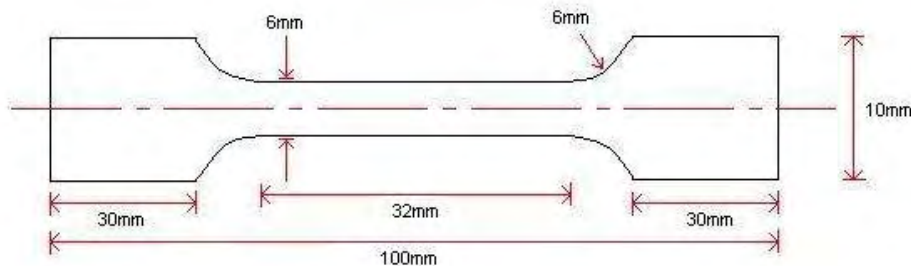
##### 4.2.2.1 Μικροσκληρομετρήσεις

Οι μετρήσεις της μικροσκληρότητας έγιναν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E92, με την μέθοδο Vickers με φορτίο επιβολής ίσο με 200gr ( $HV_{0.2}$ ) και χρόνο μέτρησης 10 δευτερόλεπτα. Η μικροσκληρομέτρηση των δοκιμίων έλαβε μέρος στο εργαστήριο Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας με το μικροσκληρόμετρο WOLPERT Micro-Vickers tester 401-MVD. Στα δοκίμια που είχαν υποστεί θερμική κατεργασία ΘΚ2, πραγματοποιήθηκαν σκληρομετρήσεις κατά μήκος του ελάσματος ανά 500μm. Έτσι, δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα απόστασης – σκληρότητας στα οποία έγινε γραμμική προσέγγιση που περιγράφει την γραμμική μεταβολή της μικροσκληρότητας με την απόσταση η οποία συσχετίζεται με το όριο διαρροής σε παρακάτω κεφάλαιο.

##### 4.2.2.2 Δοκιμές εφελκυσμού

Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E 8M-01 σε δοκίμια τόσο σε δοκίμια αναφοράς (αρχικό έλασμα) όσο και σε δοκίμια τα οποία εκτέθηκαν σε θερμική κατεργασία ΘΚ1 στους 250 και 300°C. Οι δοκιμές εφελκυσμού πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής των Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

με τη μηχανή εφελκυσμού και κόπωσης Instron 8801. Στην **Εικόνα 4.9** παρουσιάζονται οι διαστάσεις των δοκιμών σύμφωνα με την προδιαγραφή. Οι δοκιμές έγιναν με ελεγχόμενη και σταθερή μετατόπιση του εμβόλου της μηχανής με ταχύτητα 0,5mm/min.



**Εικόνα 4.9** Διαστάσεις δοκιμών εφελκυσμού



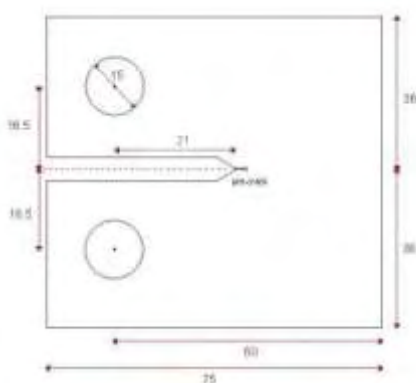
**Εικόνα 4.10** Δοκίμιο εφελκυσμού

#### 4.2.2.3 Δοκιμές Δυσθραυστότητας

Οι δοκιμές δυσθραυστότητας πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E561–98. Δοκιμές δυσθραυστότητας έγιναν σε δοκίμια αναφοράς (αρχικό έλασμα) καθώς και σε δοκίμια τα οποία είχαν υποστεί θερμική κατεργασία ΘΚ1. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν C(T) δοκίμια σύμφωνα με την παραπάνω προδιαγραφή. Τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου με σταθερή



μετατόπιση των εμβόλων της μηχανής και με ταχύτητα 0.05mm/min. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το μήκος ρωγμής μετρήθηκε με ειδικό επιμηκυνσιόμετρο (COD). Στην **Εικόνα 4.11** φαίνονται οι διαστάσεις των δοκιμών που χρησιμοποιήθηκαν. Επειδή η επιβολή της φόρτισης πρέπει να γίνει υπό την παρουσία φυσικής ρωγμής στο υλικό, πριν την διεξαγωγή του πειράματος σύμφωνα με την προδιαγραφή, δημιουργήθηκε αρχική ρωγμή (pre-crack) στην αρχική εγκοπή. Μετά την ολοκλήρωση των πειραμάτων δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα φορτίου-μήκους ρωγμής (P-a) καθώς και εν συνέχεια τα διαγράμματα συντελεστή έντασης των τάσεων – μήκους ρωγμής ( $K_R$ -a) με σκοπό τον υπολογισμό του κρίσιμου συντελεστή έντασης τάσεων  $K_c$ . Σύμφωνα με την προδιαγραφή, ο κρίσιμος συντελεστής έντασης των τάσεων  $K_c$ , αντιστοιχεί στο σημείο όπου έχουμε μέγιστο φορτίο κατά τη δοκιμή. Παρόλα αυτά, λόγω της γεωμετρίας του δοκιμίου, δεν ήταν δυνατόν να εξασφαλισθούν συνθήκες γραμμικής ελαστικότητας (LEFM) καθ' όλη την διάρκεια της δοκιμής μέχρι αυτή την τιμή του φορτίου, επομένως στα διαγράμματα ελήφθη υπόψη η μέγιστη τιμή  $K_{max}$  μέχρι την οποία ικανοποιούνται LEFM συνθήκες.



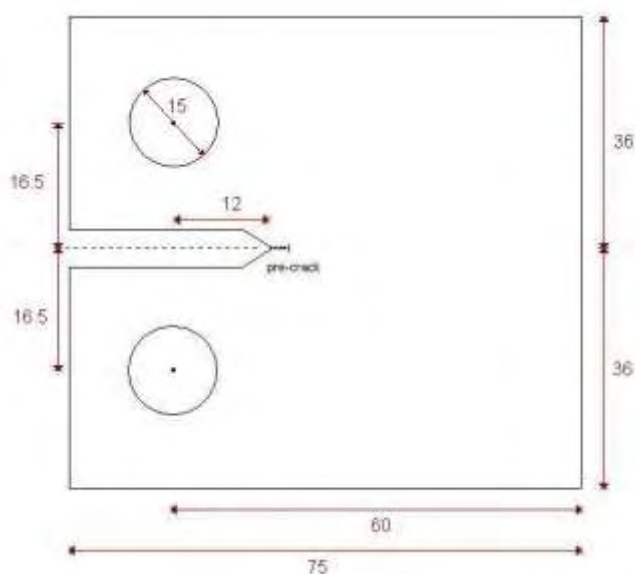
**Εικόνα 4.11** Διαστάσεις δοκιμίων δυσθραυστότητας σύμφωνα με προδιαγραφή E 561-98



**Εικόνα 4.12** Δοκιμή δυσθραυστότητας σε εξέλιξη

#### 4.2.2.4 Δοκιμές εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση

Οι δοκιμές εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E647-00 στο εργαστήριο Μηχανικής και Αντοχής Υλικών του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας στη μηχανή κόπωσης Instron 8801 100 kN. Έγιναν δοκιμές τόσο σε δοκίμια από το αρχικό έλασμα, όσο και σε δοκίμια που είχαν υποστεί θερμικές κατεργασίες ΘΚ1 και ΘΚ2. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια που κατασκευάστηκαν σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E647-00 τύπου C(T) και τα πειράματα έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου με σταθερό λόγο τάσεων  $R=0.1$ , μέγιστη τάση  $\sigma_{\max}=10\text{MPa}$  και συχνότητα 5Hz. Στην **Εικόνα 4.13** φαίνονται οι διαστάσεις του δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές.

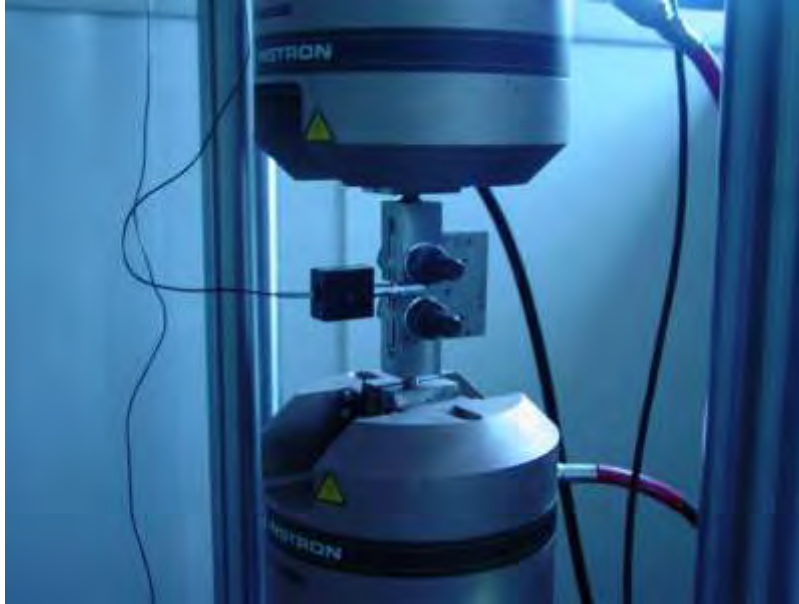


**Εικόνα 4.13** Διαστάσεις δοκιμίων κόπωσης σύμφωνα με προδιαγραφή E 647-00

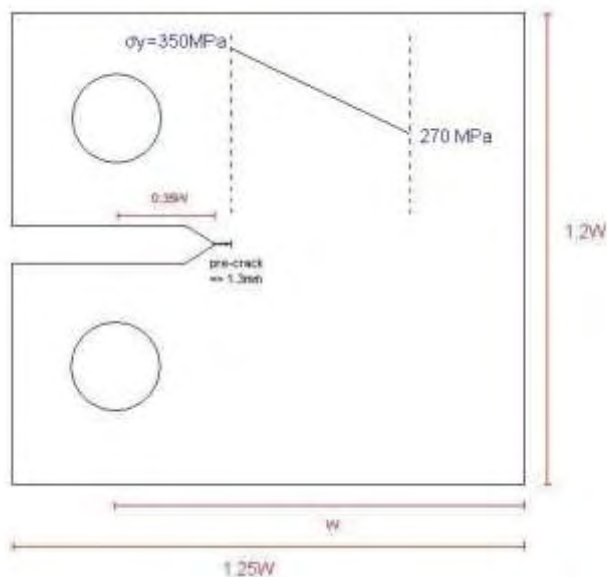
Κατά τη διάρκεια του πειράματος, η αύξηση του μήκους ρωγμής μετρήθηκε με χρήση ειδικού επιμηκυνσιομέτρου για το άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής (COD gauge). Στη συνέχεια οι μετρήσεις του ανοίγματος των χειλέων της ρωγμής μεταφράστηκαν με τη χρήση της μεθόδου ενδοτικότητας σε μήκος ρωγμής. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε αναλύεται στην επόμενη παράγραφο. Πριν την διεξαγωγή του πειράματος, σύμφωνα με την προδιαγραφή, δημιουργήθηκε με δυναμική καταπόνηση αρχική ρωγμή (pre-crack) στην αρχική εγκοπή. Μετά την ολοκλήρωση των



πειραμάτων κατασκευάσθηκαν τα διαγράμματα μήκους ρωγμής – κύκλων φόρτισης ( $a-N$ ) και ταχύτητας διάδοσης – εύρος συντελεστή εντάσεως των τάσεων ( $da/dN - DK$ ) και έγινε σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Με βάση τα πειραματικά μας αποτελέσματα έγινε υπολογισμός των πειραματικών σταθερών του Paris C και n.



**Εικόνα 4.14** Δοκιμή κόπωσης σε εξέλιξη



**Εικόνα 4.15** Περιγραφή δοκιμίου C(T) με αρνητική γραμμική μεταβολή ορίου διαρροής

#### 4.2.2.5 Μέτρηση της αύξησης του μήκους ρωγμής κατά την κόπωση - Μέθοδος ενδοτικότητας (COD)

Για τον υπολογισμό της αύξησης του μήκους ρωγμής στις δοκιμές κόπωσης καθώς και στις δοκιμές δυσθραυστότητας χρησιμοποιήθηκε, η μέθοδος της ενδοτικότητας (compliance method) σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM E1820. Κατά την δοκιμή κόπωσης, στα άκρα της εγκοπής είχε τοποθετηθεί επιμηκυνσιόμετρο τύπου COD το οποίο κατέγραφε το άνοιγμα των χειλέων της ρωγμής σε εκείνο το σημείο. Η καταγραφή του ανοίγματος γινόταν ανά 100 κύκλους φόρτισης. Στη συνέχεια με τη βοήθεια του Matlab και χρήση της μεθόδου ενδοτικότητας, έγινε μετατροπή του ανοίγματος των χειλέων της ρωγμής σε μήκος ρωγμής.

Η σχέση μεταξύ του μήκους ρωγμής  $a$  καθώς και του πλάτους του δοκιμίου  $W$  όπως περιγράφεται στην προδιαγραφή ASTM E1820 δίνεται από τη σχέση:

$$a/W = C_0 + C_1(U_x) + C_2(U_x)^2 + C_3(U_x)^3 + C_4(U_x)^4 + C_5(U_x)^5 \quad (4.1)$$

όπου

$$U_x = f\left(\frac{BEV_x}{P}\right) \quad (4.2)$$

και

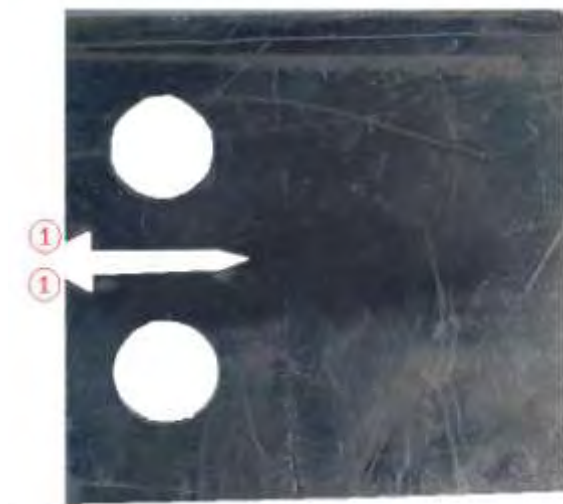
$$U_x = \frac{1}{\left(\frac{BEV_x}{P}\right)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (4.3)$$

όπου  $B$  είναι το πάχος του δοκιμίου,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας,  $P$  το μέγιστο φορτίο κατά τη δοκιμή κόπωσης και  $V_x$  το πλάτος που καταγράφεται από το COD.

Τα  $C_0, C_1, \dots, C_5$  είναι σταθερές οι οποίες εξαρτώνται από το σημείο που είναι τοποθετημένο το επιμηκυνσιόμετρο τύπου COD. Για τη περίπτωση μέτρησης του COD στο άκρο της εγκοπής (θέση 1-1 **Εικόνα 4.16**) οι τιμές είναι:

$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
1.0010	-4.6695	18.460	-236.82	1214.9	-2143.6

Το εύρος ισχύς της παραπάνω σχέσης είναι για  $0.2 \leq a/W \leq 0.975$  [16,17,18].



**Εικόνα 4.16** Δοκίμιο τύπου C(T)

Προκειμένου να ελεγχθεί αν οι υπολογισμοί ανταποκρίνονται σε πραγματικές τιμές του μήκους ρωγμής  $a$  κατά το πείραμα, έγινε επαλήθευση με την τεχνική αποτυπωμάτων ρέπλικας (replica technique). Για τον σκοπό αυτό έγιναν κάποια δοκιμαστικά πειράματα όπου γινόταν διακοπή του πειράματος κόπωσης μετά από κάποιον αριθμό κύκλων, και στη συνέχεια ασκούσαν εφελκυστικό φορτίο στο δοκίμιο, τάξεως ίδιας με της  $\sigma_{\max}$  που ασκείται στο πείραμα κόπωσης. Ο λόγος της επιβολής του φορτίου ήταν για να παραμείνει «ανοιχτή» η ρωγμή προκειμένου να φανεί το αποτύπωμα της στην ρέπλικα. Κατόπιν αφότου ασκήθηκε η  $\sigma_{\max}$  στο δοκίμιο, τοποθετήθηκε η ρέπλικα επάνω στο δοκίμιο για να αποτυπωθεί το ίχνος ρωγμής που δημιουργήθηκε κατά την κόπωση. Η ρέπλικα μελετήθηκε στη συνέχεια στο οπτικό μικροσκόπιο Leitz Wild GMBH του Εργαστηρίου Υλικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Αφού ελέγχθηκε η εγκυρότητα των μετρήσεων, από τα διαγράμματα του μήκους της ρωγμής με τους κύκλους φόρτισης δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα της ταχύτητας εξέλιξης ρωγμής – εύρους συντελεστή έντασης των τάσεων ( $da/dN - DK$ ).

Οι υπολογισμός του εύρους συντελεστή έντασης των τάσεων έγινε σύμφωνα με την σχέση [3]:

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (4.4)$$

όπου  $\Delta P$  η διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης φόρτισης κατά την κόπωση,  $\alpha = a_m / W$  για  $a_m / W \geq 0.2$ , και  $a_m$  η μέση τιμή του μήκους της ρωγμής  $a$  ανάμεσα σε 2 διαδοχικές μετρήσεις και  $da$  η διαφορά 2 διαδοχικών μετρήσεων.

Το εύρος τιμών  $\Delta K$  που χρησιμοποιήθηκε στα διαγράμματα προσδιορίστηκε με βάση τον συντελεστή εντάσεως των τάσεων  $K_{\max}$  που αντιστοιχεί στο μήκος ρωγμής και την τάση  $\sigma_{\max}$  του πειράματος, προκειμένου να ικανοποιούνται οι συνθήκες γραμμικής θεωρίας (LEFM) για να υπάρχει ισχύς του συντελεστή  $K$ . Οι υπολογισμοί έγιναν σύμφωνα με την εξίσωση [3]:

$$K_{\max} = \frac{P_{\max}}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-a)^{3/2}} (0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.6a^4) \quad (4.5)$$

όπου  $P_{\max}$  η μέγιστη φόρτιση κατά την δοκιμή κόπωσης και  $\alpha = a / W$

Για να έχουμε συνθήκες γραμμικής θεωρίας θα πρέπει να ισχύει:

$$(W-a) \geq (4/\pi)(K_{\max} / \sigma_{YS})^2 \quad (4.6)$$

#### 4.3 Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος

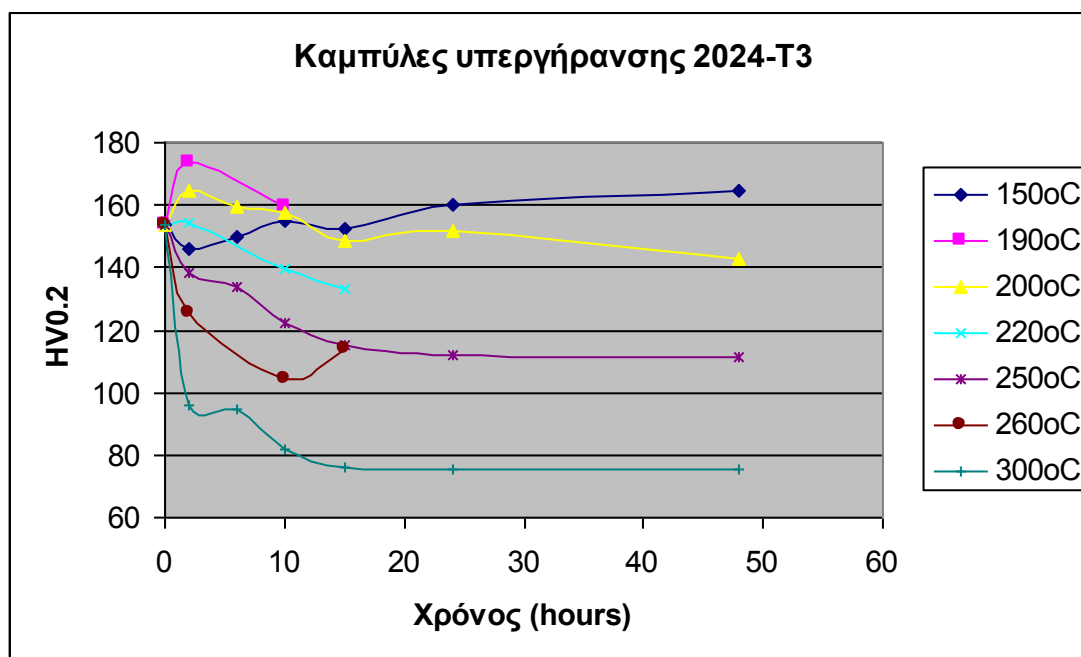
Προκείμενου να εξετάσουμε τυχόν μεταβολές της μικροδομής πριν και μετά από τις θερμικές κατεργασίες σταθερής θερμοκρασίας, εξετάσαμε την μικροδομή με χρήση οπτικού μικροσκόπιου τόσο του αρχικού ελάσματος όσο και δοκιμίου μετά την έκθεση του στους 300 °C για 15 ώρες.

Αρχικά, έγινε εγκιβωτισμός μικρού κομματιού του ελάσματος το οποίο στη συνέχεια λειάνθηκε στους τροχούς Knuth-Roter-3 της Struers με λειαντικά χαρτιά (300, 500, 800, 1000, 2400) και στη συνέχεια στίλβωση με το μηχάνημα Dap-V της Struers με διαμαντόπαστα 3μm, 1μm καθώς και με αλουμίνα. Τέλος, έγινε χημική προσβολή του δοκιμίου με το αντιδραστήριο Keller's (2mL HF (48%), 3mL HCl, 5mL HNO<sub>3</sub>, 190mL H<sub>2</sub>O) για 5-10sec. Ο μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος έγινε με το οπτικό μικροσκόπιο Leitz Wild GMBH.

## 5. Αποτελέσματα

### 5.1 Θερμικές Κατεργασίες – Διάγραμμα υπεργήρανσης

Στο **Διάγραμμα 5.1** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της θερμικής κατεργασίας ΘΚ1 για θερμοκρασίες από 150 έως 300°C.

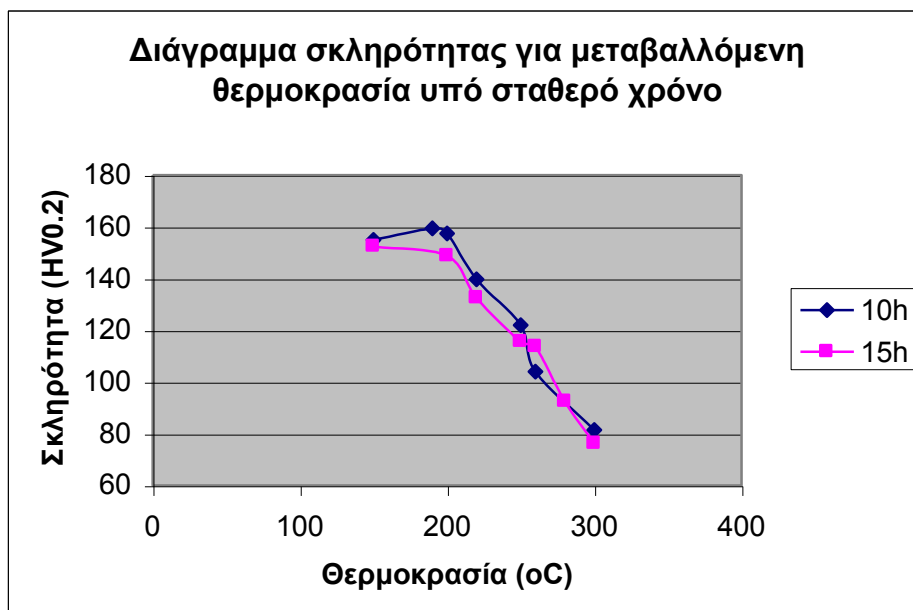


**Διάγραμμα 5.1** Καμπύλες υπεργήρανσης κράματος Alclad 2024-T3

Από το **Διάγραμμα 5.1** γίνεται αντιληπτό ότι από τους 150 έως τους 200°C δεν παρουσιάστηκε κάποια αισθητή μεταβολή στην μικροσκληρότητα των δοκιμίων, ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες (220 έως 300°C) παρουσιάστηκε πτώση την μικροσκληρότητας η οποία μεγιστοποιείται για θερμική κατεργασία 300°C και διάρκεια 10-15 ώρες και φθάνει την τιμή των 75 Hv.

Επομένως, οι συνθήκες υπεργήρανσης για το κράμα 2024 και για τους χρόνους που εξετάστηκαν, επιτυγχάνονται για θερμοκρασίες άνω των 220°C, ενώ η τιμή μικροσκληρότητας σταθεροποιείται για χρόνο μεγαλύτερο των 15 ωρών, ανεξάρτητα από την θερμική κατεργασία.

Στο **Διάγραμμα 5.2** φαίνεται η μεταβολή της σκληρότητας με τη θερμοκρασία για σταθερούς χρόνους θερμικής κατεργασίας 10 και 15 ωρών.

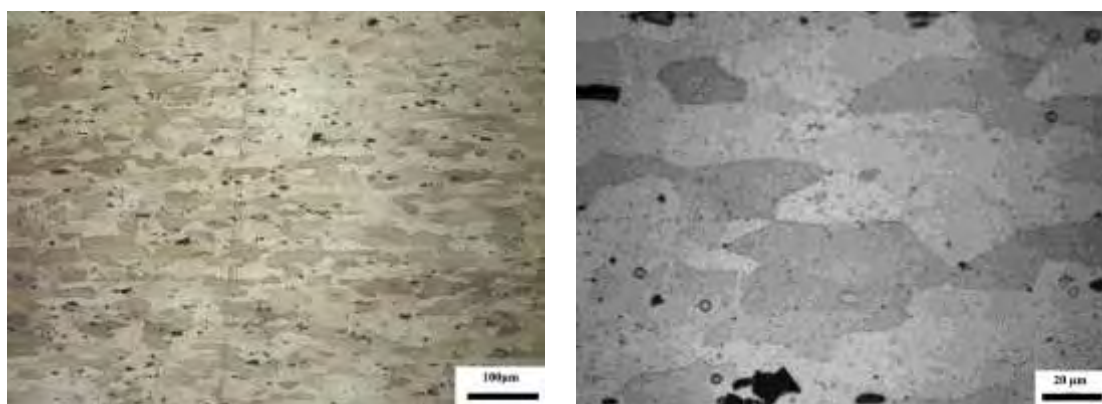


**Διάγραμμα 5.2** Καμπύλες μεταβολής της σκληρότητας με τη θερμοκρασία για σταθερούς χρόνους θερμικής κατεργασίας 10 και 15 ωρών

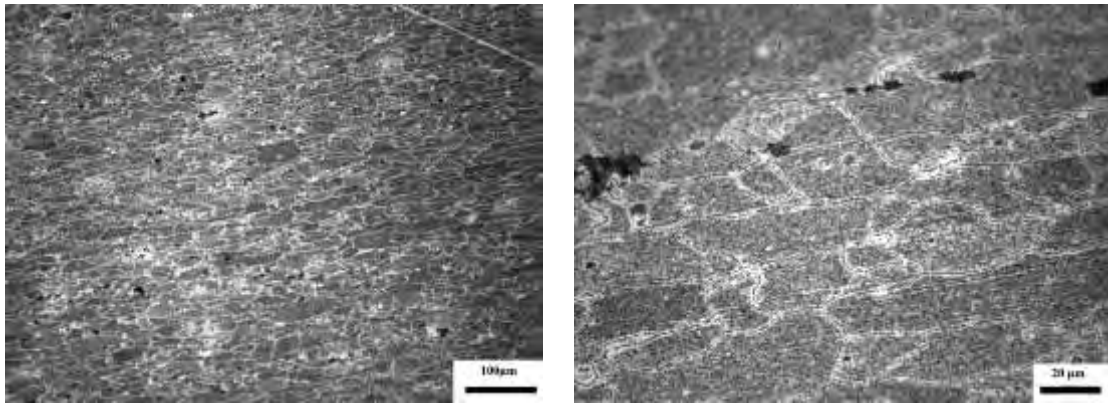
Στο **Διάγραμμα 5.2** φαίνεται ότι από τους 200°C και πάνω (θερμοκρασία στην οποία δεν παρουσιάζεται μεταβολή της μικροσκληρότητας σε σχέση με το αρχικό έλασμα) σταδιακά υπάρχει πτώση της μικροσκληρότητας από τα 155HVn στα 80HVn, η οποία αντιστοιχεί στο 50% της αρχικής τιμής σκληρότητας του υλικού.

## 5.2 Μικροσκοπικός οπτικός έλεγχος

Στις **Εικόνες 5.1-2** παρουσιάζονται οι φωτογραφίες από το οπτικό μικροσκόπιο για το αρχικό μας έλασμα καθώς και για το έλασμα μετά από έκθεση στους 300°C για 15 ώρες.



**Εικόνα 5.1** Μικροδομή αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3



**Εικόνα 5.2** Μικροδομή ελάσματος Alclad 2024-T3 μετά από έκθεση στους 300 °C για 15ώρες

Στην εικόνα του αρχικού ελάσματος φαίνεται η ύπαρξη επιμηκυμένων κόκκων στη φορά έλασης. Τα σωματίδια που εμφανίζονται με μαύρο σκούρο χρώμα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [25], είναι σωματίδια  $\text{CuMgAl}_2$  (S φάση),  $\text{Cu}_2\text{MnAl}_{20}$  και  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$ . Η διασπορά της φάσης ισχυροποίησης θ, θ' είναι σε μικρότερη κλίμακα και δεν διακρίνεται. Στις εικόνες του κράματος μετά την θερμική κατεργασία, δεν διακρίνονται φαινόμενα ανακρυστάλλωσης. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [19] όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το 2024 έχει θερμοκρασία ανόπτησης τους 413°C και είναι δυνατόν να εμφανιστούν και φαινόμενα μεγέθυνσης των κόκκων σε θερμοκρασίες λίγο μικρότερες έως και 345°C. Για μέτρηση των κόκκων και επιβεβαίωση του ότι δεν υπάρχει μεγέθυνση προτείνεται σε μελλοντική εργασία να γίνει κοκκομέτρηση των 2 δοκιμών σύμφωνα με την προδιαγραφή E112. Τέλος, παρατηρούμε ότι μετά την θερμική κατεργασία η φάση θ έχει διαλυτοποιηθεί από τα όρια των κόκκων και έχει καθιζάνει στο εσωτερικό κάθε κόκκου. Παρατηρείται η χαρακτηριστική ζώνη PFZ (Precipitate Free Zone) στα όρια των κόκκων. Παράλληλα, υπάρχει διεύρυνση της φάσεως ισχυροποίησης θ'. Τα σωματίδια  $\text{CuMgAl}_2$  (S φάση),  $\text{Cu}_2\text{MnAl}_{20}$  και  $\text{Cu}_2\text{FeAl}_7$  δείχνουν να μην έχουν μεταβληθεί. Για περαιτέρω ανάλυση προτείνεται να γίνει χημική μικροανάλυση με τη μέθοδο EDS του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

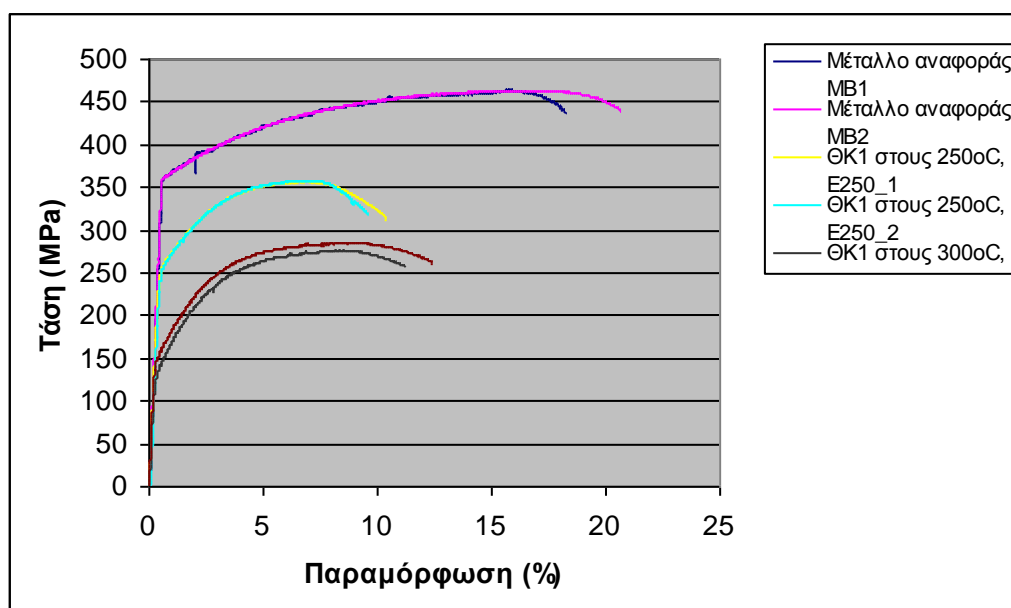


### 5.3 Δοκιμές εφελκυσμού

Τα αποτελέσματα των δοκιμών εφελκυσμού για δοκίμια αναφοράς και δοκίμια με ΘΚ1 στους 250°C και 300°C παρουσιάζονται στον **Πίνακα 5.1** (τιμές μηχανικών ιδιοτήτων) και στο **Διάγραμμα 5.3** (ονομαστικές καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης σ-ε).

**Πίνακας 5.1** Αποτελέσματα δοκιμής εφελκυσμού

	Όριο διαρροής $R_{0.2}$ (MPa)	Παραμόρφωση θραύσης $A_{25}$ (%)	Όριο θραύσης $R_m$ (MPa)
Δοκίμια αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3			
EMB1	377	18	464
EMB2	366	20	466
Δοκίμιο εκτεθειμένο σε 250 °C για 15ώρες (ΘΚ1)			
E250_1	257	11	354
E250_2	263	9.5	358
Δοκίμιο εκτεθειμένο σε 300 °C για 15ώρες (ΘΚ1)			
E300_1	145	11	276
E300_2	158	12	285



**Διάγραμμα 5.3** Καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης δοκιμών εφελκυσμού

Από τις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης προκύπτει ότι το αρχικό έλασμα έχει όριο διαρροής 370 MPa, όριο θραύσης 460 MPa και παραμόρφωση θραύσης 20%. Ύστερα από έκθεση του υλικού σε 250 και 300°C, το όριο διαρροής μειώνεται σε 260 και 150 MPa αντίστοιχα, το όριο θραύσης σε 355 και 280 MPa, ενώ η παραμόρφωση θραύσης σε 10 με 12 %. Επίσης, φαίνεται ότι ενώ μειώνεται το όριο διαρροής του υλικού, ταυτόχρονα υποβαθμίζεται και η ολκιμότητα του με την παραμόρφωση θραύσης να μειώνεται σε ποσοστό 45% για ΘΚ1 σε θερμοκρασίες 250°C και 300°C.

#### 5.4 Συσχετισμός ορίου διαρροής – μικροσκληρότητας

Η συσχέτιση του ορίου διαρροής ( $\sigma_y$ ) με την μικροσκληρότητα (Hv) ενός μετάλλου από την βιβλιογραφία, είναι  $\sigma_y = 3 \cdot H_v$ . Προκειμένου να συσχετιστούν οι τιμές σκληρότητας και εφελκυσμού που προέκυψαν σε προηγούμενο υποκεφάλαιο η παραπάνω σχέση τροποποιήθηκε στη μορφή  $\sigma_y = 3 \cdot H_v - 90$ , όπου η τιμή -90 είναι διορθωτικός συντελεστής. Στον **Πίνακα 5.2** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το όριο διαρροής του υλικού από την εμπειρική σχέση  $\sigma_y = 3 \cdot H_v - 90$ .

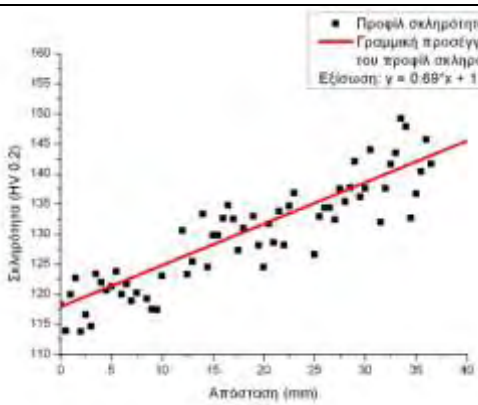
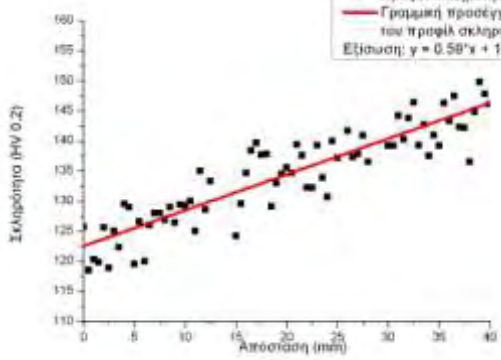
**Πίνακας 5.2** Συσχετισμός ορίου διαρροής - μικροσκληρότητας

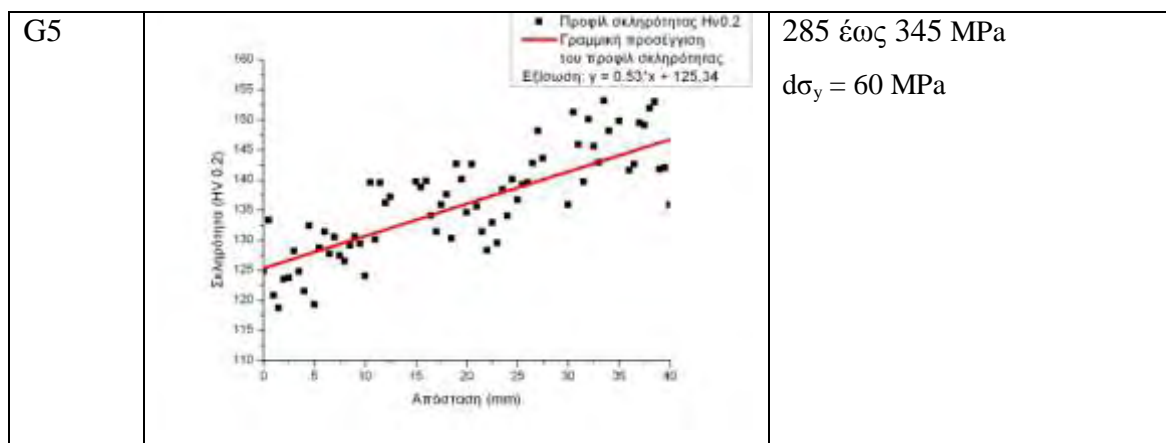
	Σκληρότητα	Όριο διαρροής	Σχέση ορίου διαρροής - σκληρότητας
MB	153Hv	366-377 MPa	$\sigma_y = 3 \cdot H_v - 90$
250°C – 15h	115-120 Hv	257-263 MPa	
300 °C – 15h	76-81 Hv	145-158 MPa	

## 5.5 Γραμμική μεταβολή ορίου διαρροής

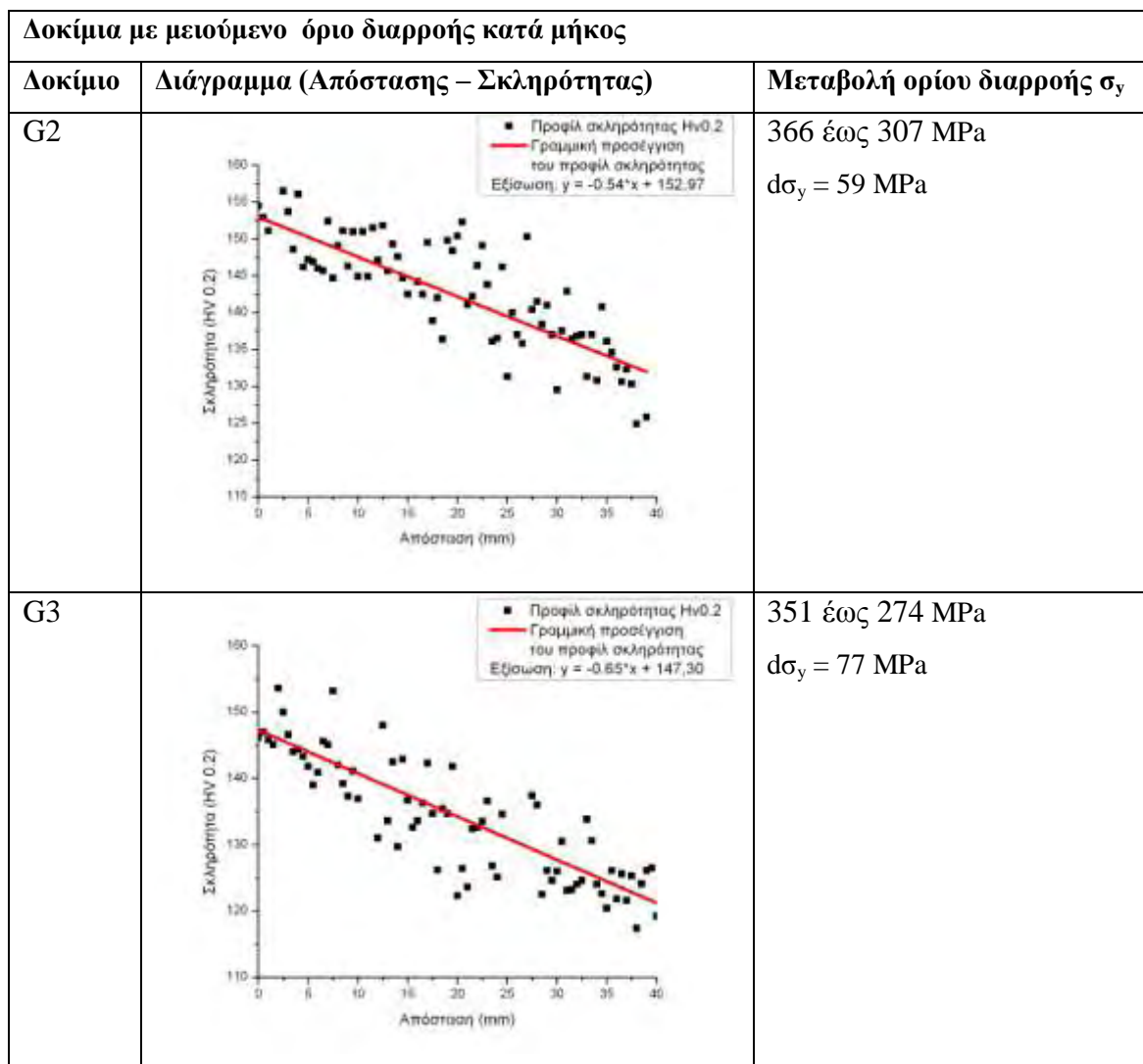
Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, μετά το πέρας της θερμικής κατεργασίας με γραμμικά μεταβαλλόμενη θερμοκρασία, έγινε σκληρομέτρηση κατά μήκος του ελάσματος και στη συνέχεια μέσω του προγράμματος Origin έγινε γραμμική προσέγγιση της μεταβολής της μικροσκληρότητας. Στους **Πίνακες 5.3 και 5.4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεταβολής σκληρότητας με την απόσταση για κάθε δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε.

**Πίνακας 5.3** Διαγράμματα μεταβολής ορίου διαρροής με θετική κλίση στην μεταβολή του ορίου διαρροής μπροστά από την αιχμή της ρωγμής δοκιμίων C(T) που χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμές εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση

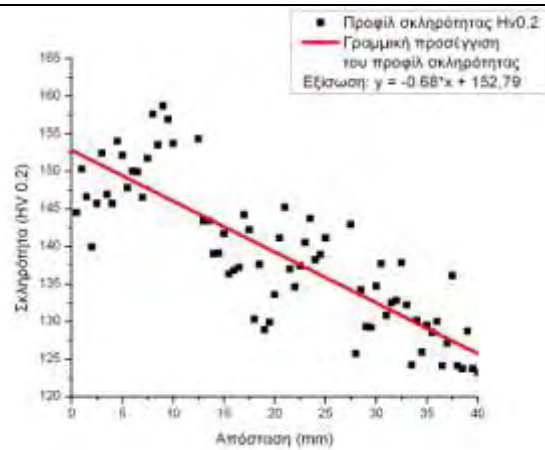
Δοκίμια με αυξανόμενο όριο διαρροής κατά μήκος		
Δοκίμιο	Διάγραμμα (Απόστασης – Σκληρότητας)	Μεταβολή ορίου διαρροής $\sigma_y$
G1		262 έως 342 MPa $d\sigma_y = 80 \text{ MPa}$
G4		277 έως 348 MPa $d\sigma_y = 71 \text{ MPa}$



**Πίνακας 5.4** Διαγράμματα μεταβολής ορίου διαρροής με αρνητική κλίση στην μεταβολή του ορίου διαρροής μπροστά από την αιχμή της ρωγμής δοκιμίων C(T) που χρησιμοποιήθηκαν για δοκιμές εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση



G6



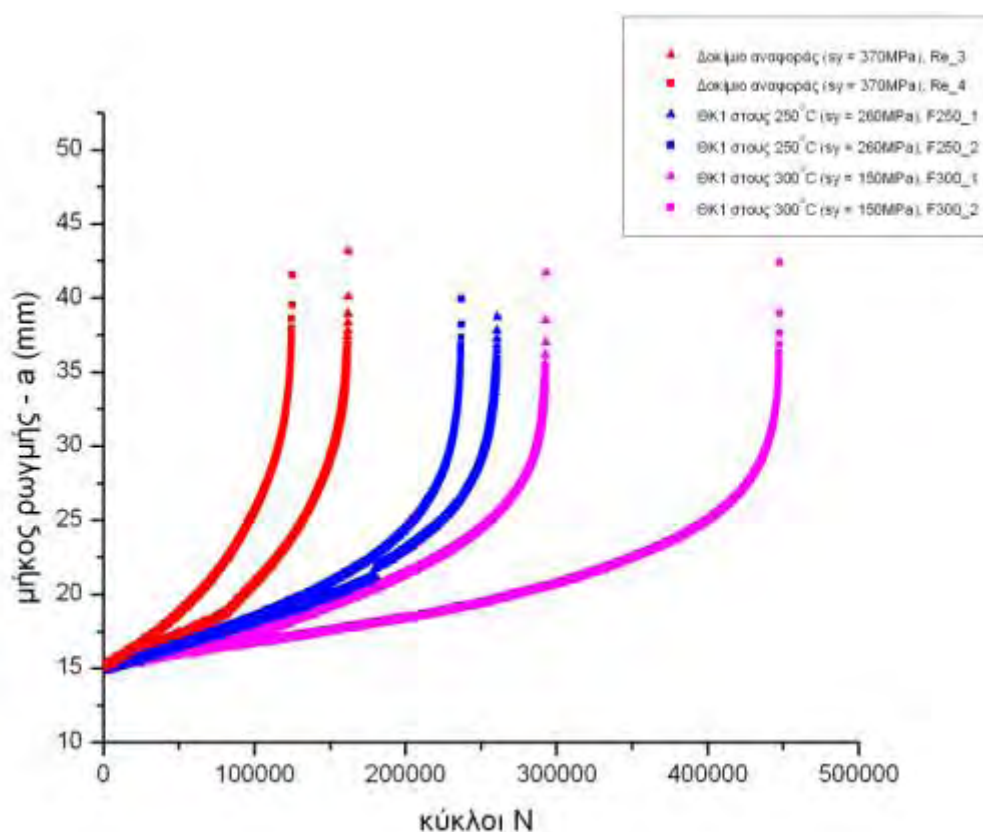
366 έως 285 MPa

$d\sigma_y = 81 \text{ MPa}$

## 5.6 Δοκιμές εξέλιξης ρωγμών

Για την μελέτη της επίδρασης του ορίου διαρροής στην εξέλιξη ρωγμής σε κόπωση έγιναν δοκιμές κόπωσης σε C(T) δοκίμια τόσο από το αρχικό έλασμα όσο και σε δοκίμια από ελάσματα που είχαν εκτεθεί σε θερμικές κατεργασίες ΘΚ1 και ΘΚ2. Στα **Διαγράμματα 5.4-9** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση για το έλασμα αναφοράς και για τα ελάσματα με θερμικές κατεργασίες ΘΚ1 και ΘΚ2.

Τα δοκίμια αναφοράς συγκρίνονται στο **Διάγραμμα 5.4** με τα δοκίμια θερμικής κατεργασίας ΘΚ1 τα οποία εκτέθηκαν σε 250 και 300°C για 15 ώρες.

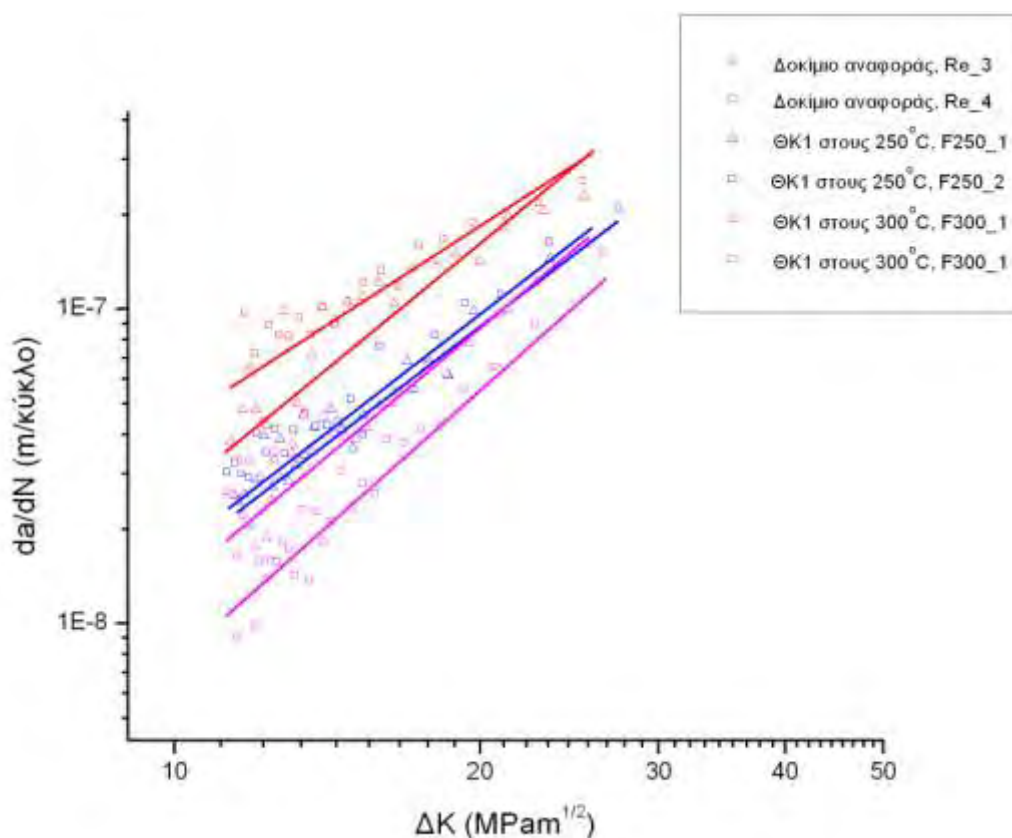


**Διάγραμμα 5.4** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από θερμική κατεργασία (Διαγράμματα a-N)

Σύμφωνα με το **Διάγραμμα 5.4** παρατηρείται ότι η διάρκεια ζωής των 2 δοκιμών αναφοράς C(T) ελάσματος Alclad 2024-T3 σε δυναμική φόρτιση με  $\sigma_{\max} = 10\text{MPa}$  και  $R=0.1$  είναι 161.900 και 124.900 κύκλοι.

Επιπλέον, από τις καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης προκύπτει ότι η διάρκεια ζωής δοκιμών σε κόπωση εξέλιξης ρωγμής είναι αντιστρόφως ανάλογη με την τιμή του ορίου διαρροής του υλικού. Συγκεκριμένα τα δοκίμια με ΘΚ1 στους 250 και 300°C για 15ώρες που παρουσίασαν τιμή ορίου διαρροής 260MPa και 150MPa αστόχησαν σε θραύση μετά από 250.000 κύκλους και 370.000 κύκλους αντίστοιχα (κατά μέσο όρο). Οι τιμές δείχνουν αύξηση της διάρκειας ζωής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς που είχαν διάρκεια ζωής κατά μέσο όρο 143.000 κύκλους και όριο διαρροής από τα πειράματα εφελκυσμού 370MPa.

Συγκριτικά, για τα δύο δοκίμια με θερμική κατεργασία το δοκίμιο με ΘΚ1 250°C έχει μικρότερη διάρκεια ζωής αλλά υψηλότερο όριο διαρροής σε σχέση με το δοκίμιο με ΘΚ1 300°C που είχε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.



**Διάγραμμα 5.5** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από θερμική κατεργασία

Από τις καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων (**Διάγραμμα 5.5**) παρατηρείται ότι οι ρυθμοί διάδοσης

ρωγμής των δοκιμών που έχουν υποστεί θερμική κατεργασία είναι μικρότεροι από αυτούς του αρχικού ελάσματος και διατηρούνται μικρότεροι για όλο το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων  $\Delta K$ . Όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του ορίου διαρροής λόγω της θερμικής κατεργασίας, τόσο μεγαλύτερη ήταν η μείωση του ρυθμού διάδοσης ρωγμής σε κόπωση.

Στον **Πίνακα 5.5** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα διάρκειας ζωής των πειραμάτων:

**Πίνακας 5.5** Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης δοκιμών πριν και μετά από θερμική κατεργασία

Τύπος υλικού	Δοκίμιο	Αρχικό μήκος ρωγμή $a_0$ (mm)	Τελικό μήκος ρωγμής $a_f$ (mm)	Σταθερά Paris C	Σταθερά Paris n	Διάρκεια ζωής (κύκλοι)
Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)	Re_3	15,1769	43,2158	$5,24 \times 10^{-11}$	2,69	161.900
	Re_4	15,237	41,5714	$3,52 \times 10^{-10}$	2,09	124.900
ΘΚ1 στους 250°C για 15 ώρες	F250_1	14,954	38,7444	$6,59 \times 10^{-11}$	2,4	260.600
	F250_2	14,9438	39,9466	$5,58 \times 10^{-11}$	2,49	236.900
ΘΚ1 στους 300°C για 15 ώρες	F300_1	15,1164	41,7487	$2,93 \times 10^{-11}$	2,67	292.800
	F300_2	15,1366	42,4036	$9,02 \times 10^{-12}$	2,91	447.700

Στον **Πίνακα 5.6** παρουσιάζεται ο μέσος όρος των 5 αρχικών τιμών του ρυθμού διάδοσης ρωγμής κατά την εκκίνηση του πειράματος για το εύρος  $\Delta K$  μεταξύ 11-12  $MPa\sqrt{m}$ :

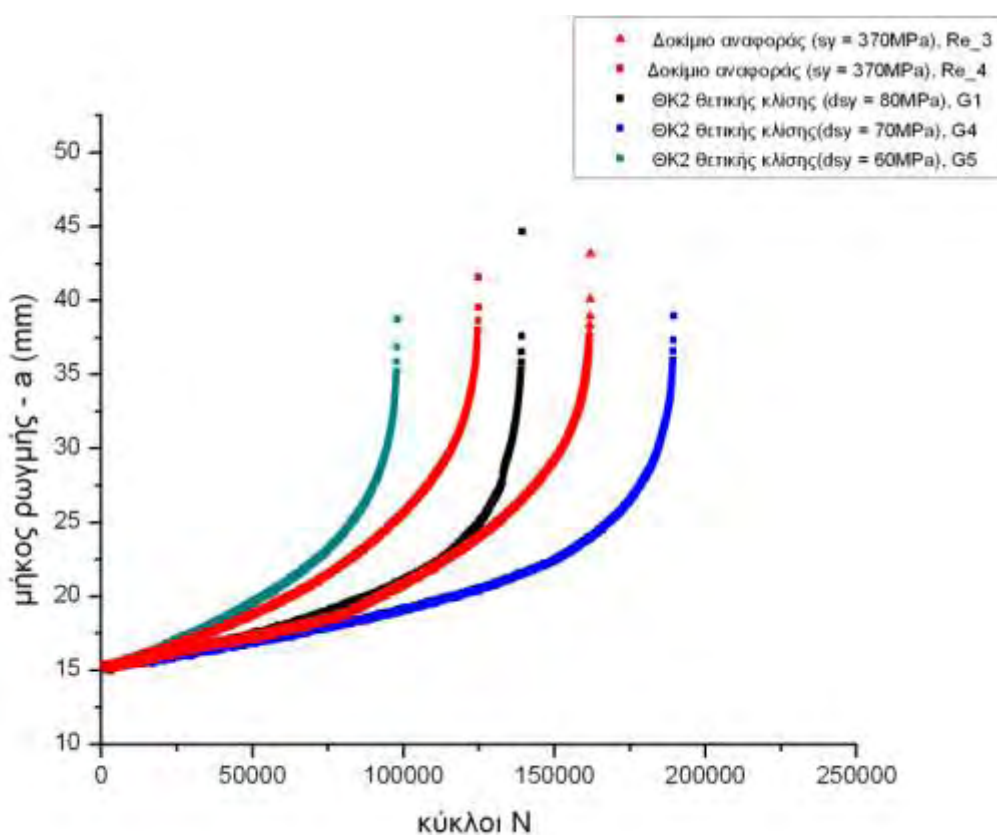
**Πίνακας 5.6** Αρχικές τιμές ρυθμού διάδοσης δοκιμών πριν και μετά από θερμική κατεργασία

	Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)		ΘΚ1 στους 250°C για 15 ώρες		ΘΚ1 στους 300°C για 15 ώρες	
	Re_3	Re_4	F250_1	F250_2	F300_1	F300_2
$\Delta K \left( MPa\sqrt{m} \right)$	11-12	11-12	11-12	11-12	11-12	11-12
$da / dN \left( m / cycle \right)$	$4 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-8}$	$2.9 \times 10^{-8}$	$3.4 \times 10^{-8}$	$2.4 \times 10^{-8}$	$1.8 \times 10^{-8}$



Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 5.6** ενώ η αρχική τιμή για το έλασμα χωρίς θερμική κατεργασία είναι της τάξης του  $5 \times 10^{-8}$  m/κύκλο στα δοκίμια με θερμική κατεργασία πέφτει έως και  $1.8 \times 10^{-8}$  m/κύκλο σε δοκίμια που είχαν υποστεί ΘΚ1 σε 300°C για 15 ώρες.

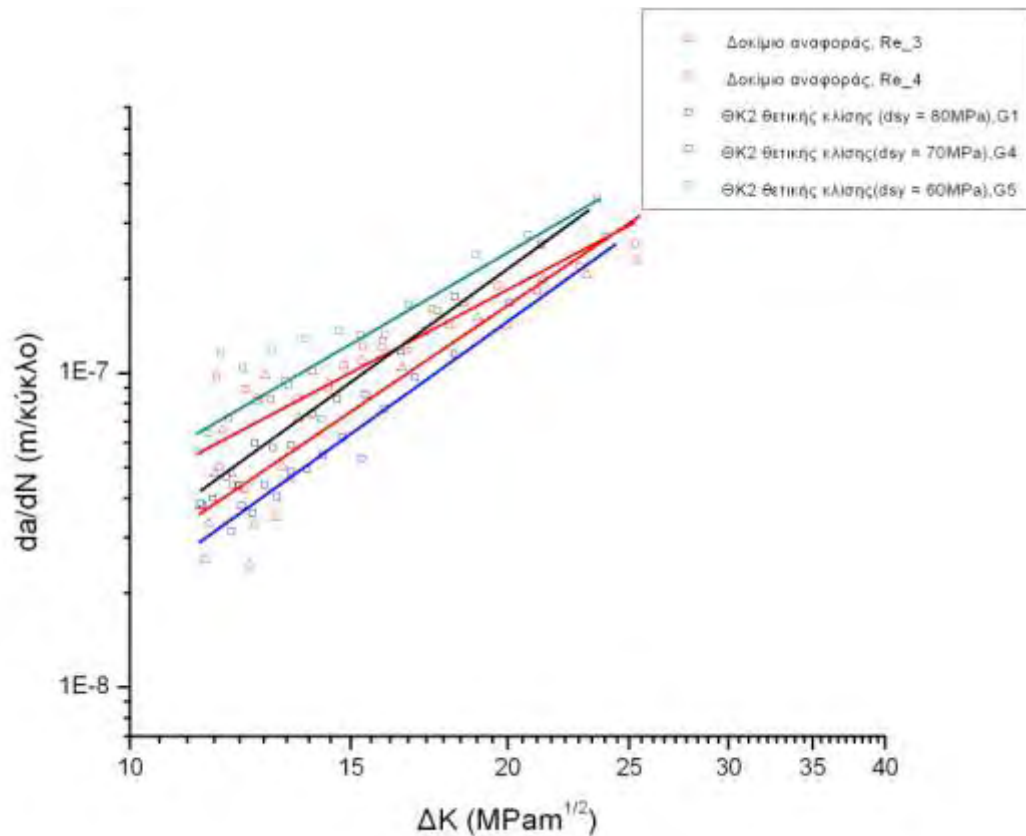
Στο **Διάγραμμα 5.6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση για το αρχικό έλασμα σε σύγκριση με θερμική κατεργασία ΘΚ2. Αρχικά γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων για δοκίμια με θετική κλίση στην μεταβολή του ορίου διαρροής μπροστά από το άκρο της ρωγμής (**Πίνακας 5.3**).



**Διάγραμμα 5.6** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με θετική κλίση (Διαγράμματα a-N)

Από τις καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης του **Διαγράμματος 5.6** προκύπτει ότι δεν υπάρχει έντονη διαφοροποίηση της διάρκειας ζωής των δοκιμίων με μεταβαλλόμενο όριο διαρροής θετικής κλίσης σε σχέση με το αρχικό έλασμα, λαμβάνοντας υπόψη την διασπορά των τιμών διάρκειας ζωής.

Συνεπώς, για την συγκεκριμένη περίπτωση δεν προκύπτει σαφής επίδραση στην εξέλιξη ρωγμής σε δοκίμια με θετική κλίση του ορίου διαρροής μπροστά στο άκρο της ρωγμής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.



**Διάγραμμα 5.7** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με θετική κλίση

Από τις καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων του **Διαγράμματος 5.7** προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα με το προηγούμενο διάγραμμα, δηλαδή καμία αισθητή μεταβολή των ρυθμών εξέλιξης ρωγμής των δοκιμίων με θετική κλίση του ορίου διαρροής μπροστά στο άκρο της ρωγμής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς.

Στον **Πίνακα 5.7** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων.

**Πίνακας 5.7** Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης δοκιμών μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής θετικής κλίσης

Τύπος υλικού	Δοκίμιο	Μεταβολή ορίου διαρροής $d\sigma$ (MPa)	Αρχικό μήκος ρωγμή $a_0$ (mm)	Τελικό μήκος ρωγμής $a_f$ (mm)	Σταθερά Paris C	Σταθερά Paris n	Διάρκεια ζωής (κύκλοι)
Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)	Re_3	-	15,1769	43,2158	$5,24 \times 10^{-11}$	2,69	161.900
	Re_4	-	15,237	41,5714	$3,52 \times 10^{-10}$	2,09	124.900
ΘΚ2 θετικής κλίσης	G1	80	15,1769	44,6725	$3.58 \times 10^{-11}$	2.91	139.300
	G4	70	15,1164	38,9739	$2.86 \times 10^{-11}$	2.85	189.500
	G5	60	15,0962	38,7601	$2.33 \times 10^{-10}$	2.32	98.000

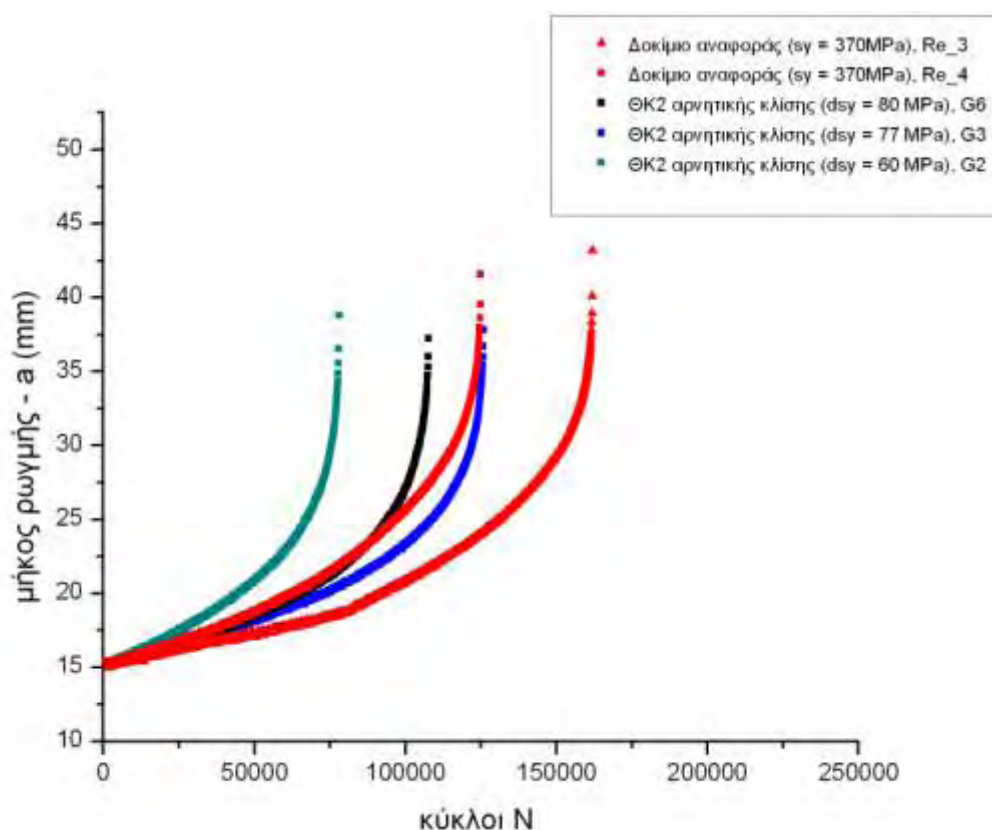
Στον **Πίνακα 5.8** παρουσιάζεται ο μέσος όρος των 5 αρχικών τιμών του ρυθμού διάδοσης κατά την εκκίνηση του πειράματος για το εύρος ΔΚ μεταξύ 11-12  $MPa\sqrt{m}$  :

**Πίνακας 5.8** Αρχικές τιμές ρυθμού διάδοσης δοκιμών μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής θετικής κλίσης

	Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)		ΘΚ2 θετικής κλίσης		
	Re_3	Re_4	G1	G4	G5
ΔΚ ( $MPa\sqrt{m}$ )	11-12	11-12	11-12	11-12	11-12
$da / dN$ (m / cycle)	$4 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-8}$	$4.7 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$	$8.35 \times 10^{-8}$

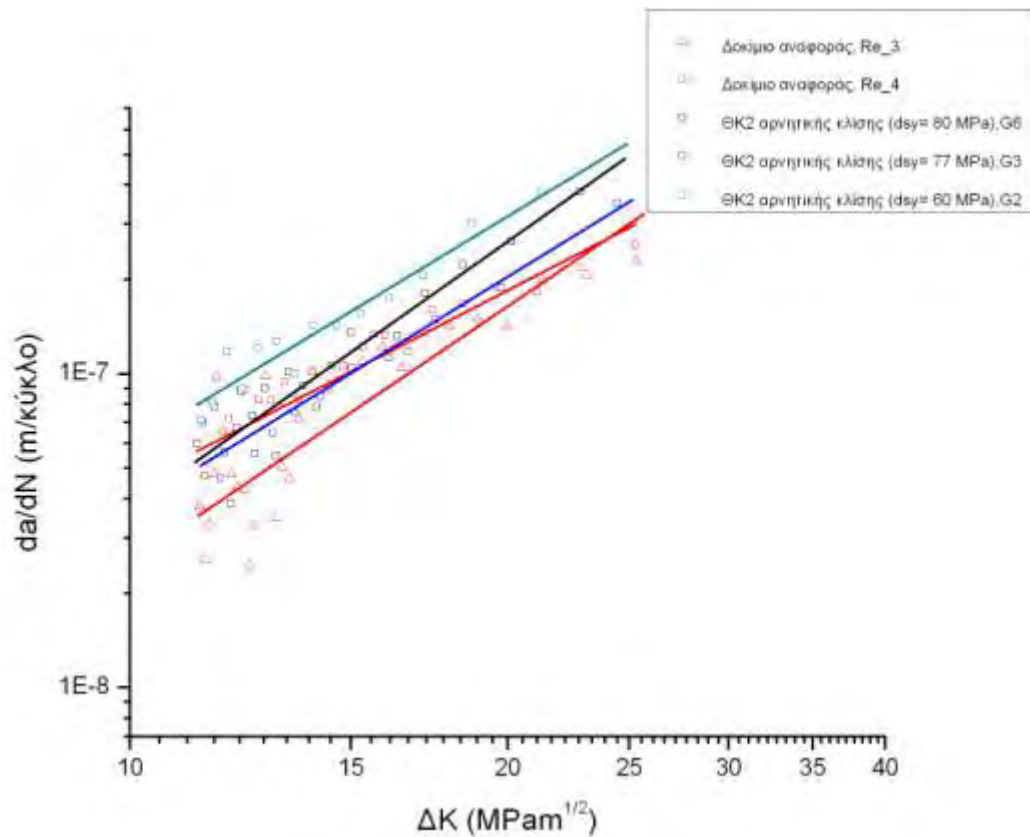
Είναι φανερό ότι ενώ η αρχική τιμή για το έλασμα χωρίς θερμική κατεργασία είναι περίπου  $6 \times 10^{-8}$  m/κύκλο στα δοκίμια με μεταβαλλόμενο όριο διαρροής θετικής κλίσης η αρχική ταχύτητα ρυθμού διάδοσης παραμένει στις ίδιες τιμές, με διαφορά μόνο στο δοκίμιο G5 όπου υπάρχει αύξηση του αρχικού ρυθμού σε  $8.35 \times 10^{-8}$  m/κύκλο.

Στα **Διαγράμματα 5.8 και 5.9** παρουσιάζονται οι καμπύλες αύξησης του μήκους ρωγμής με τους κύκλους κόπωσης και ρυθμού εξέλιξης ρωγμής με το εύρος ΔΚ για δοκίμια που είχαν υποστεί ΘΚ2 και η μεταβολή του ορίου διαρροής μπροστά στο άκρο της ρωγμής έχει αρνητική κλίση (**Πίνακας 5.4**).



**Διάγραμμα 5.8** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με αρνητική κλίση (Διαγράμματα a–N)

Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 5.8** από τις καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης υπάρχει υποβάθμιση της διάρκειας ζωής των δοκιμίων ΘΚ2. Η παραπάνω συμπεριφορά προκύπτει από συνολικά 3 δοκίμια με ΘΚ2 με μέσο όρο διάρκειας ζωής 104.000 κύκλους ενώ ο αντίστοιχος μέσος όρος των δοκιμίων αναφοράς ήταν 143.000 κύκλους.



**Διάγραμμα 5.9** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με αρνητική κλίση

Αντίστοιχα, στις καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) του **Διαγράμματος 5.9** με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων, προκύπτουν υψηλότεροι ρυθμοί διάδοσης του ρήγματος οι οποίοι διατηρούνται σε όλο το εύρος του  $\Delta K$ , για τα δοκίμια με ΘΚ2.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των παραπάνω πειραμάτων εξέλιξης ρωγμής για δοκίμια με ΘΚ2 και αρνητική κλίση του ορίου διαρροής.

**Πίνακας 5.9** Αποτελέσματα δοκιμών κόπωσης δοκιμών μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής αρνητικής κλίσης

Δοκίμιο		Μεταβολή ορίου διαρροής $d\sigma$ (MPa)	Αρχικό μήκος ρωγμή $a_0$ (mm)	Τελικό μήκος ρωγμής $a_f$ (mm)	Σταθερά Paris C	Σταθερά Paris n	Διάρκεια ζωής (κύκλοι)
Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)	Re_3	-	15,1769	43,2158	$5,24 \times 10^{-11}$	2,69	161.900
	Re_4	-	15,237	41,5714	$3,52 \times 10^{-10}$	2,09	124.900
ΘΚ2 αρνητικής κλίσης	G6	81	15,0456	37,251	$5,69 \times 10^{-11}$	2.82	107.600
	G3	77	15,0456	37,8383	$1.28 \times 10^{-10}$	2.46	125.800
	G2	59	15,1467	38,817	$2.03 \times 10^{-10}$	2.46	78.000

Στον **Πίνακα 5.10** παρουσιάζεται ο μέσος όρος των 5 αρχικών τιμών του ρυθμού διάδοσης κατά την εκκίνηση του πειράματος για το εύρος  $\Delta K$  μεταξύ 11-12  $MPa\sqrt{m}$  :

**Πίνακας 5.10** Αρχικές τιμές ρυθμού διάδοσης δοκιμών μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής αρνητικής κλίσης

	Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)		ΘΚ2 αρνητικής κλίσης		
	Re_3	Re_4	G6	G3	G2
$\Delta K \left( MPa\sqrt{m} \right)$	11-12	11-12	11-12	11-12	11-12
$da / dN \left( m / cycle \right)$	$4 \times 10^{-8}$	$6.5 \times 10^{-8}$	$6.6 \times 10^{-8}$	$6 \times 10^{-8}$	$9.6 \times 10^{-8}$

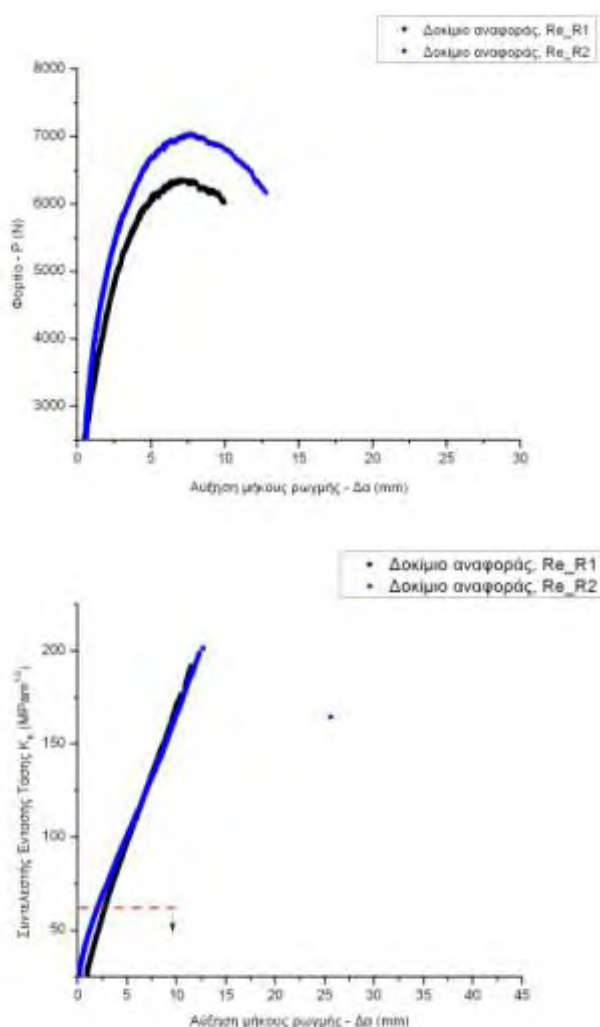
Παρατηρείται ότι ενώ η αρχική τιμή για το έλασμα χωρίς θερμική κατεργασία είναι περίπου  $6 \times 10^{-8}$  m/κύκλο στα δοκίμια με μεταβαλλόμενο όριο διαρροής αρνητικής κλίσης η αρχική ταχύτητα ρυθμού διάδοσης παραμένει στα ίδια επίπεδα, με διαφορά μόνο στο δοκίμιο G2 όπου έχουμε αύξηση του αρχικού ρυθμού σε  $9.6 \times 10^{-8}$  m/κύκλο. Το δοκίμιο G2 είναι έχει  $d\sigma_y=60MPa$  και είναι το δοκίμιο το

οποίο παρουσίασε τη χαμηλότερη διάρκεια ζωής σε σχέση με τα υπόλοιπα συμπεριλαμβανομένου και των δοκιμίων του μετάλλου αναφοράς.

## 5.7 Δοκιμές Δυσθραυστότητας

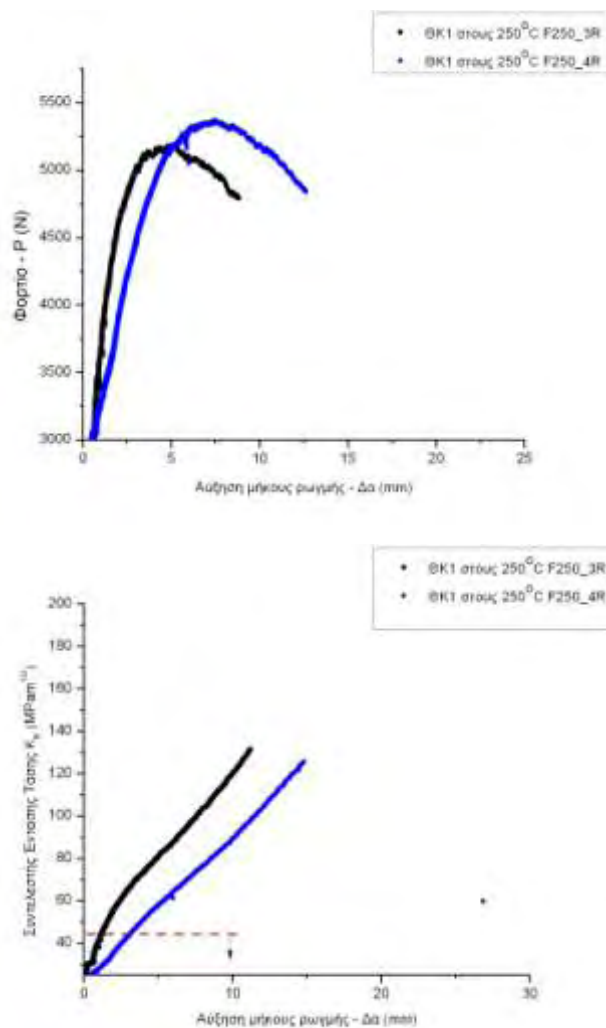
Όπως αναφέρθηκε στην περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές δυσθραυστότητας στο αρχικό έλασμα καθώς και σε δοκίμια τα οποία είχαν υποστεί θερμική κατεργασία ΘΚ1 σε θερμοκρασία 250 και 300°C για 15 ώρες.

Στα **Διαγράμματα 5.10-12** παρουσιάζεται η μεταβολή του φορτίου σε σχέση με την αύξηση του μήκους ρωγμής (P-Δα) και του συντελεστή έντασης τάσεων με την αύξηση του μήκους ρωγμής ( $K_R - \Delta a$ ). Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός της μέγιστης τιμής του συντελεστή έντασης των τάσεων  $K_{max}$  για κάθε δοκίμιο.

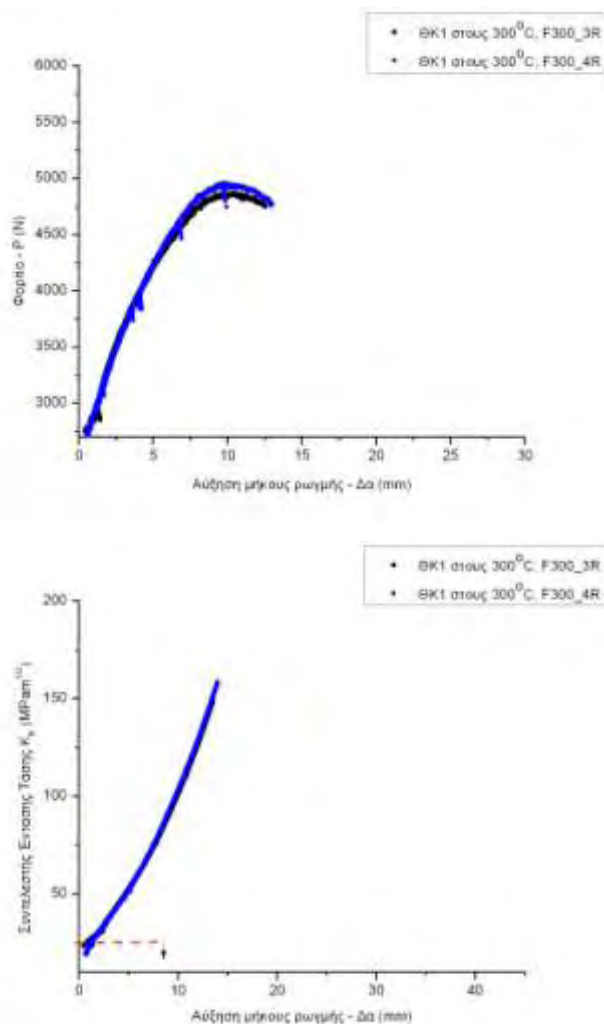


**Διαγράμμα 5.10** Καμπύλες φορτίου – αύξησης μήκους ρωγμής (P-Δα) & συντελεστή έντασης τάσεων – αύξησης μήκους ρωγμής ( $K_R - \Delta a$ ) για έλασμα Alclad 2024- T3





**Διαγράμμα 5.11** Καμπύλες φορτίου – αύξησης μήκους ρωγμής (P- $\Delta a$ ) & συντελεστή έντασης τάσεων – αύξησης μήκους ρωγμής ( $K_R$  –  $\Delta a$ ) για έλασμα Alclad 2024- T3 μετά από έκθεση στους 250<sup>0</sup>C για 15 ώρες



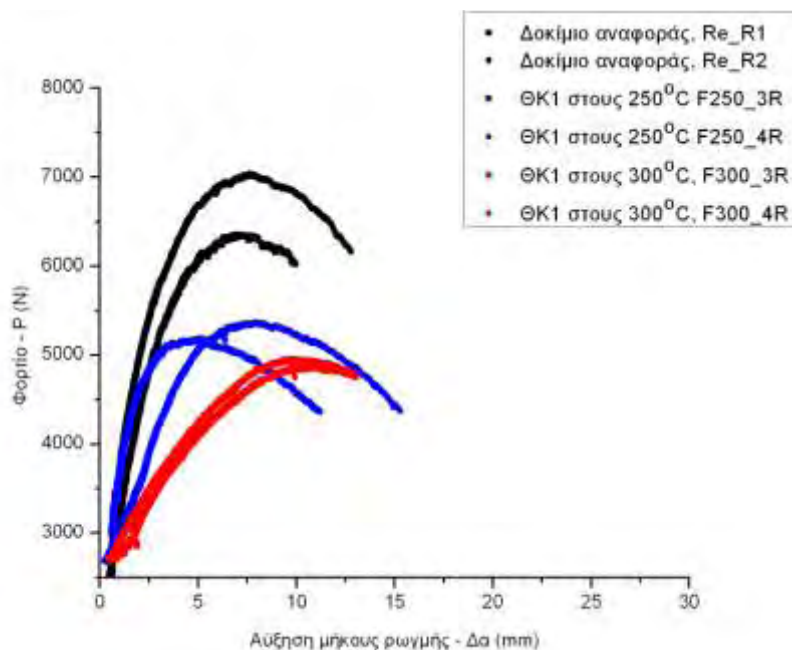
**Διαγράμμα 5.12** Καμπύλες φορτίου – αύξησης μήκους ρωγμής (P- $\Delta a$ ) & συντελεστή έντασης τάσεων – αύξησης μήκους ρωγμής ( $K_R - \Delta a$ ) για έλασμα Alclad 2024- T3 μετά από έκθεση στους  $300^\circ C$  για 15 ώρες

Από τα διαγράμματα φορτίου – μήκους ρωγμής και τα διαγράμματα του συντελεστή έντασης των τάσεων, παρατηρείται ότι ο μέγιστος συντελεστής έντασης των τάσεων του αρχικού ελάσματος ( $K_{max}$ ) μειώνεται στα δοκίμια με  $\Theta K1$  τα οποία έχουν μειωμένο όριο διαρροής σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς. Επίσης παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η τιμή του ορίου διαρροής, τόσο μειώνεται και το  $K_{max}$ . Δηλαδή τα δοκίμια με  $\Theta K1$  στους  $300^\circ C$  παρουσιάζει μικρότερη  $K_{max}$  τιμή σε σχέση με το δοκίμιο  $\Theta K1$  στους  $250^\circ C$ . Στον **Πίνακα 5.11** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα δοκιμών δυσθραυστότητας για δοκίμια αναφοράς και δοκίμια με  $\Theta K1$ :

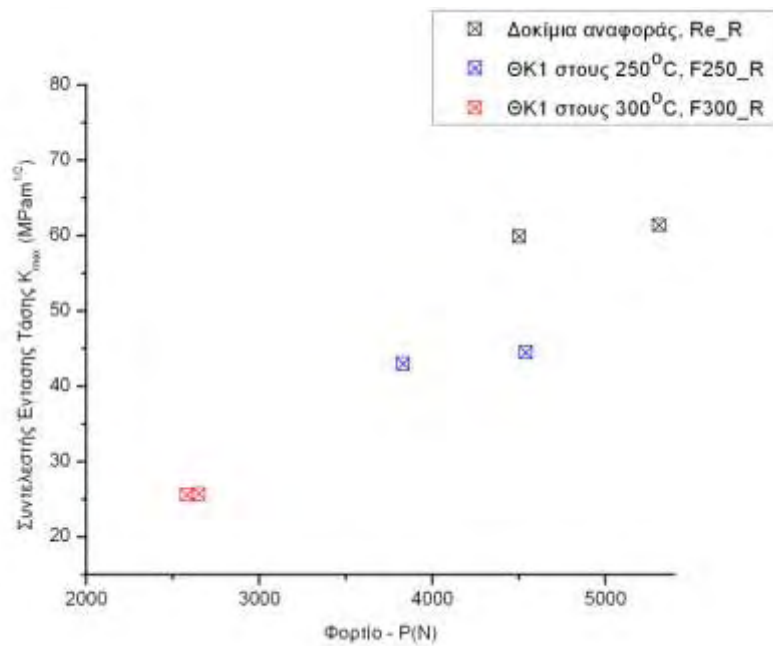
**Πίνακας 5.11** Αποτελέσματα δοκιμής δυσθραυστότητας ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από θερμική κατεργασία

Δοκίμιο	$K_{\max} (MPa \times \sqrt{m})$	$P_{(K_{\max})} (N)$	$a_{(K_{\max})} (mm)$	$P_{\max} (N)$	$a_{(P_{\max})} (mm)$
Re_R1	60	4500	26.6	6360	30
Re_R2	61.5	5310	24.8	7000	30
F250_3R	43	3830	24.6	5160	28.5
F250_4R	44.5	4540	22.6	5300	25.5
F300_3R	25.7	2650	22.4	4800	31
F300_4R	25.6	2581	22.8	4900	31.3

Τέλος, στα **Διαγράμματα 5.13-4** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα διαγράμματα φορτίου – μήκους ρωγμής (P-a), καθώς και μέγιστου συντελεστή έντασης τάσεων – φορτίου ( $K_{\max} - P$ ).



**Διαγράμμα 5.13** Καμπύλες φορτίου – αύξησης μήκους ρωγμής (P-Δα) ελάσματος Alclad 2024- T3 πριν και μετά από θερμική κατεργασία



**Διαγράμμα 5.14** Καμπύλες μέγιστου συντελεστή έντασης τάσεων – φορτίου ( $K_{\max}$ -P) ελάσματος Alclad 2024- T3 πριν και μετά από θερμική κατεργασία

## 6. Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής σε κόπωση μέσω υπολογιστικού μοντέλου

Για την πρόβλεψη της διάδοσης ρωγμής λόγω κόπωσης έγινε κατάλληλη τροποποίηση και χρήση τμήματος του μοντέλου LTSM-F. Το μοντέλο LTSM-F και οι βασικές αρχές που χρησιμοποιεί αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3.4.

Στις εξισώσεις (3.38-9), η εμπειρική παράμετρος  $m$  (συντελεστής ολκιμότητας) κυμαίνεται στην περιοχή μεταξύ 0.5-0.7, με τυπική τιμή για μέταλλα 0.6 [6,13]. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία ενδεικτικές τιμές για το κράμα 2024 και τις παρουσιάζουμε στον **Πίνακα 6.1**.

**Πίνακας 6.1** Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή ολκιμότητας για το κράμα 2024 [15,20,21]

Υλικό	Συντελεστής ολκιμότητας
2024-T3	-0.59
2024-T351	-0.713 , -0.59
2024-T4	-0.645

### 6.1 Αναλυτικά αποτελέσματα για μέταλλο αναφοράς και με σταθερό όριο διαρροής (ΘΚ1)

Για την ανάλυση επιλέχθηκε μια μέση τιμή του  $m = 0,6$ . Αρχικά, έγινε μια παραμετρική μελέτη όπου χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των συντελεστών του Paris  $C$ ,  $n$  από την πειραματική διαδικασία για το υλικό αναφοράς καθώς και για τα δοκίμια με ΘΚ1. Στην ουσία έγινε μια προσέγγιση (fitting) της πειραματικής διαδικασίας πάνω στο μοντέλο ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά του μοντέλου με βάση τις παραμέτρους και η ευαισθησία του σε αυτές. Οι τιμές των συντελεστών  $A$ ,  $\beta$  της εξίσωσης υπολογίστηκαν μέσω των σχέσεων (3.38) και (3.39) όπου  $C$ ,  $n$  οι τιμές των σταθερών του Paris που υπολογίστηκαν από την πειραματική διαδικασία. Στο μοντέλο η τιμή του κρίσιμου συντελεστή έντασης των τάσεων, ήταν η μέγιστη τιμή  $K_{max}$  που προσδιορίστηκε από τις δοκιμές δυσθραυστότητας ( $K_c = K_{max}$ ).

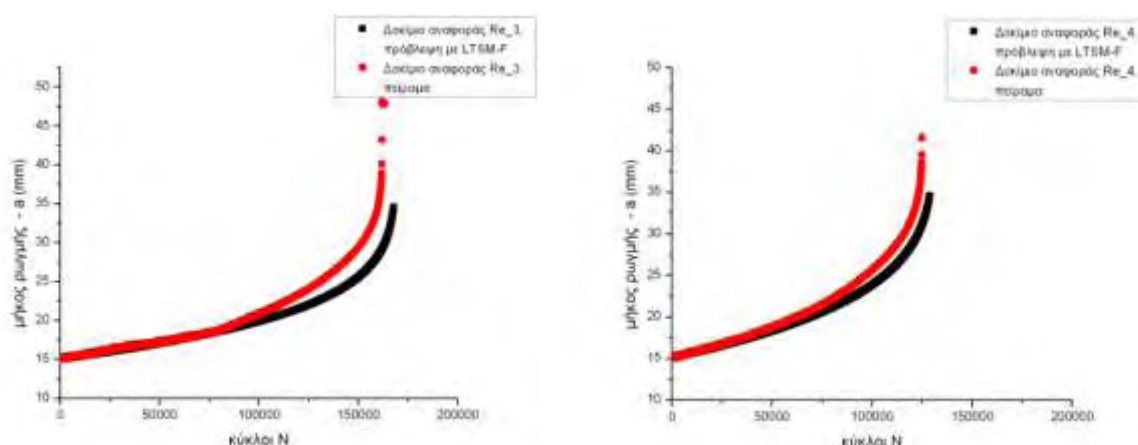
Στον **Πίνακα 6.2** φαίνονται οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα LTSM-F για την προσέγγιση της εξέλιξης ρωγμής στο υλικό αναφοράς και στα υλικά με ΘΚ1 στους 250 και 300°C. Οι παράμετροι αφορούν πειραματικές σταθερές, γεωμετρία δοκιμίου και φορτία κόπωσης.

**Πίνακας 6.2** Παράμετροι μοντέλου LTSM-F για προσέγγιση πειραματικής διαδικασίας

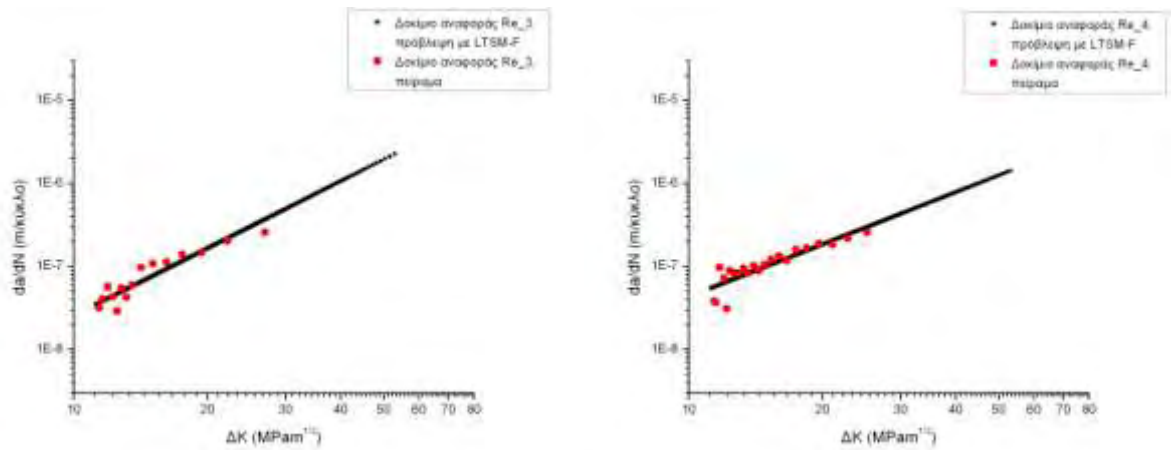
	Δοκίμιο	Όριο διαρροής $S_y$	$K_{max}$ ( $MPa\sqrt{m}$ )	C	n	$\beta$	A
Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)	Re_3	370	60	$5,24 \times 10^{-11}$	1,69	1,793	$3,1846 \times 10^{-4}$
	Re_4	370	60	$3,52 \times 10^{-10}$	2,09	1,973	$7,8234 \times 10^{-5}$
ΘΚ1 στους 250°C για 15 ώρες	F250_1	260	44	$6,59 \times 10^{-11}$	2,4	1,88	$6,9926 \times 10^{-5}$
	F250_2	260	44	$5,58 \times 10^{-11}$	2,49	1,853	$9,0974 \times 10^{-5}$
ΘΚ1 στους 300°C για 15 ώρες	F300_1	150	25.6	$2,93 \times 10^{-11}$	2,67	1.799	$5,3821 \times 10^{-5}$
	F300_2	150	25.6	$9,02 \times 10^{-12}$	2,91	1.727	$6,4549 \times 10^{-5}$

Στα **Διαγράμματα 6.1-4** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του κώδικα καθώς και η σύγκριση τους με τα πειραματικά αποτελέσματα.

- Έλασμα Alclad 2024-T3

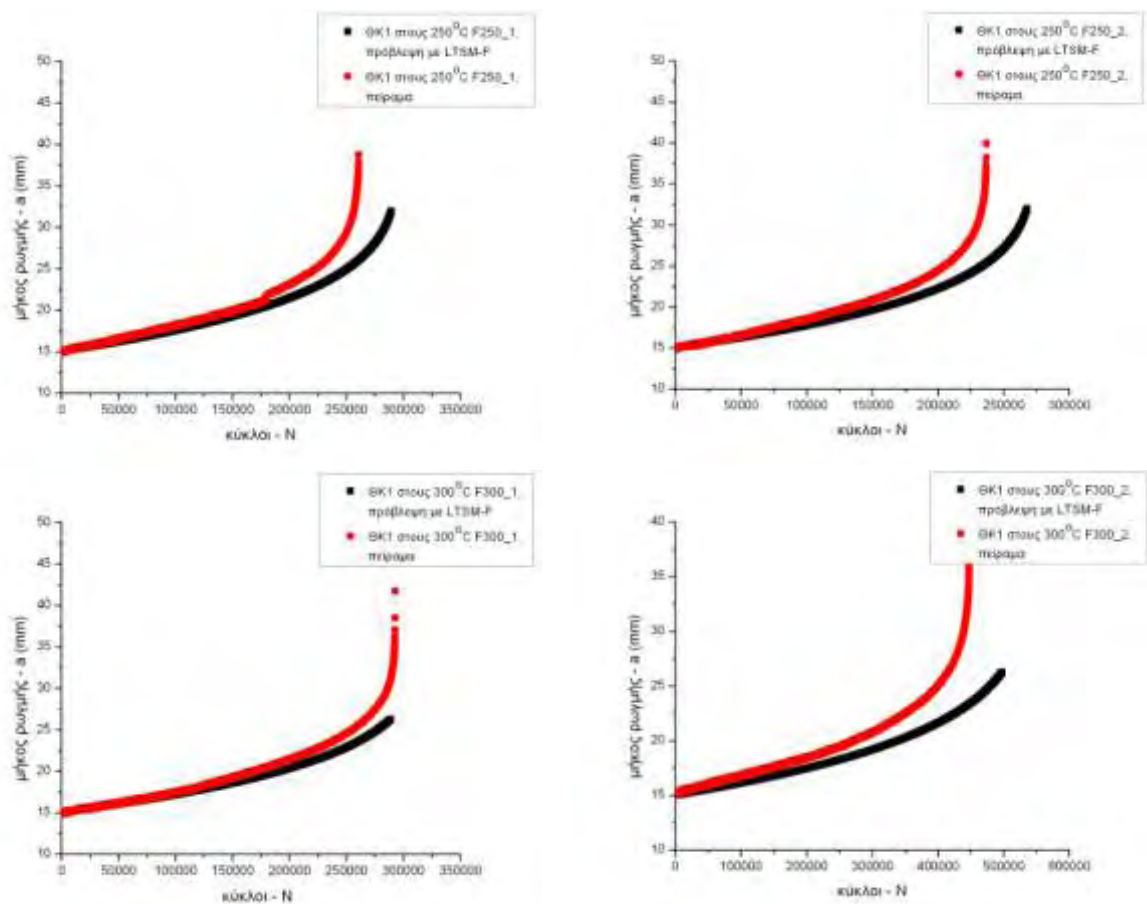


**Διάγραμμα 6.1** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης (a-N) αρχικού ελάσματος Al2024-T3 σε σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής

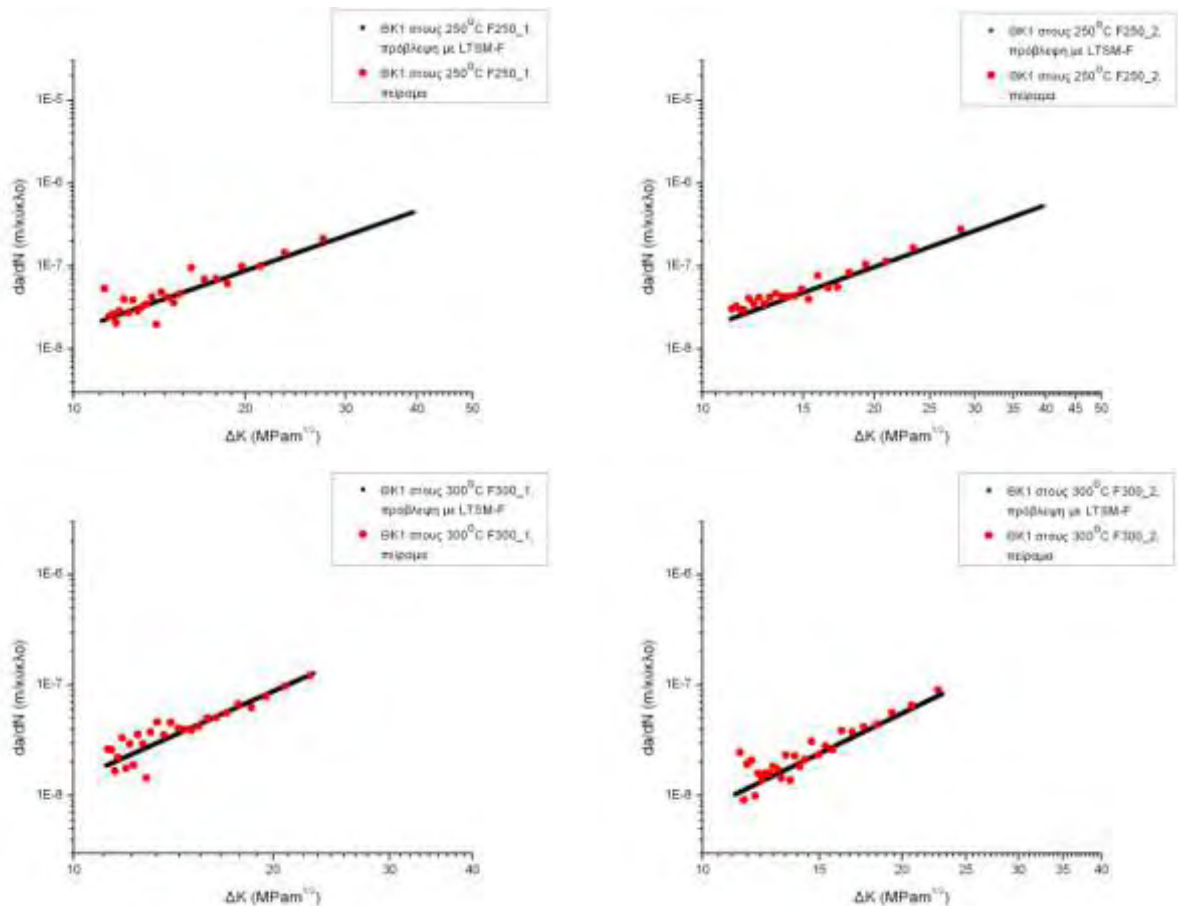


**Διάγραμμα 6.2** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 σε σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής

- Έλασμα Alclad 2024-T3 μετά από θερμική κατεργασία σταθερής θερμοκρασίας



**Διάγραμμα 6.3** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης ( $a$ - $N$ ) ελάσματος Alclad 2024-T3 σε σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής μετά από θερμική κατεργασία σταθερής θερμοκρασίας



**Διάγραμμα 6.4** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 σε σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής μετά από θερμική κατεργασία σταθερής θερμοκρασίας

Χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους που δόθηκαν στον **Πίνακα 6.2** στον κώδικα του μοντέλου, το μοντέλο αποκρίνεται πολύ καλά στην πειραματική συμπεριφορά εξέλιξης ρωγμής τόσο για το αρχικό έλασμα όσο και για το έλασμα μετά από θερμική κατεργασία ΘΚ1.

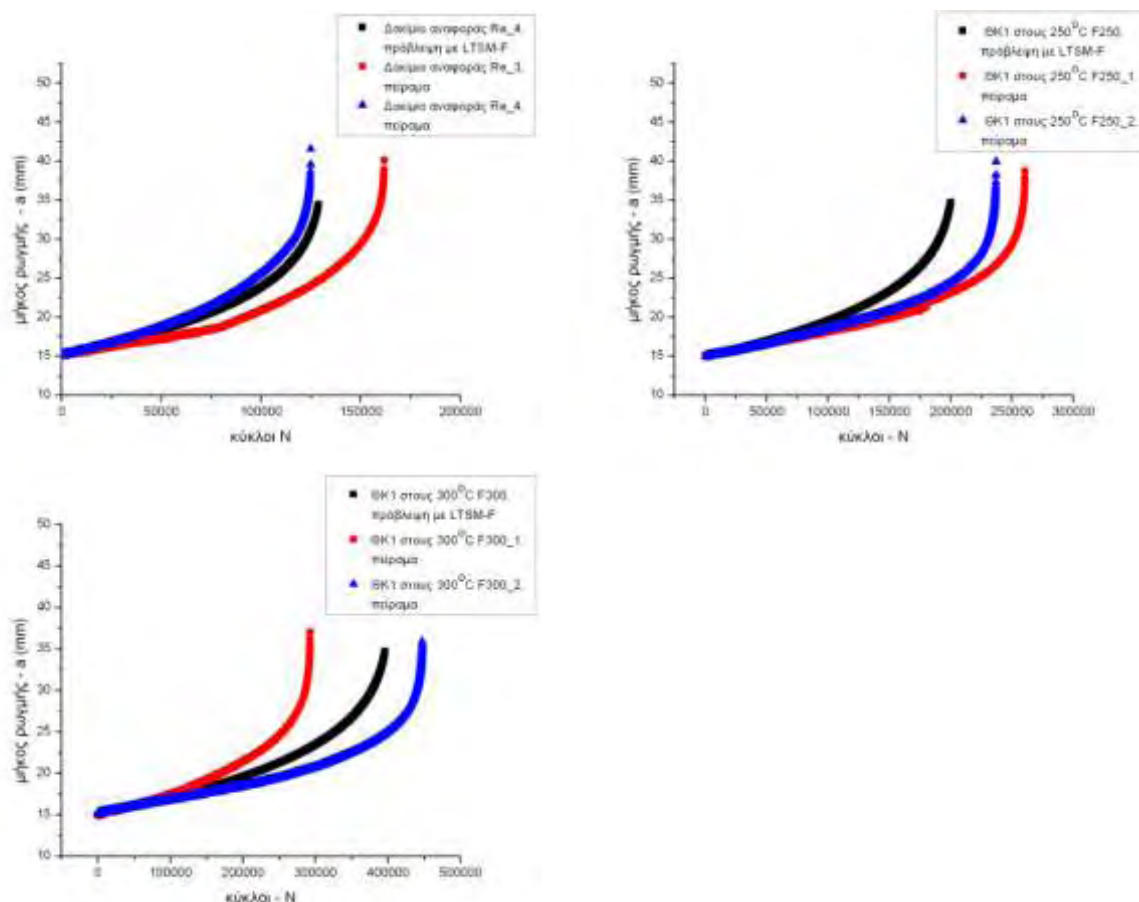
Στον **Πίνακα 6.3** παρουσιάζεται η διάρκεια ζωής σε κόπωση του υλικού αναφοράς και του υλικού μετά από ΘΚ1, έτσι όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο σε σχέση με την πειραματική διαδικασία



**Πίνακας 6.3** Αποτελέσματα προσέγγισης μοντέλου LTSM-F στην πειραματική διαδικασία

		Μοντέλο LTSM-F			Πειραματικά αποτελέσματα	
Δοκίμιο		Διάρκεια ζώης N (κύκλοι)	$K_{\max}$ ( $MPa\sqrt{m}$ )	Τελικό μήκος ρωγμής $a_f$ (mm) μέχρι $K = K_{\max}$	Διάρκεια ζώης N (κύκλοι)	Τελικό μήκος ρωγμής $a_f$ (mm)
Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)	Re_3	167800	60	34,573	161.900	43,2158
	Re_4	128900	60	34,602	124.900	41,5714
ΘΚ1 στους 250°C για 15 ώρες	F250_1	289500	44	31,97	260.600	38,7444
	F250_2	267800	44	31,976	236.900	39,9466
ΘΚ1 στους 300°C για 15 ώρες	F300_1	288900	25.6	26,279	292.800	41,7487
	F300_2	497800	25.6	26,275	447.700	42,4036

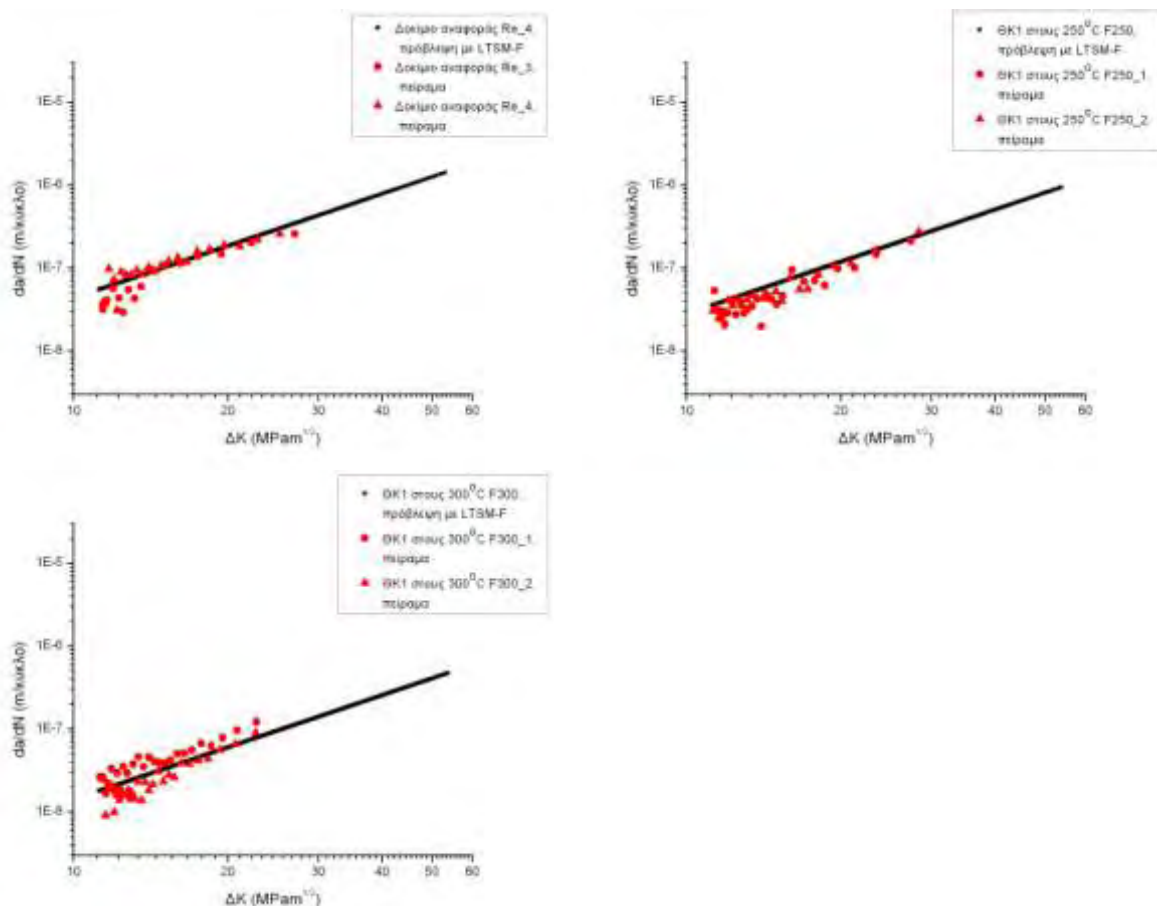
Στην συνέχεια της αναλυτικής διερεύνησης με χρήση του μοντέλου LTSM-F διατηρήθηκαν σταθερές οι παράμετροι Α και β (από το υλικό αναφοράς) και ελήφθη υπόψη μόνο η μεταβολή του ορίου διαρροής στην προσομοίωση με το μοντέλο. Στα **Διαγράμματα 6.5-6** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με χρήση της παραπάνω μεθόδου για το υλικό αναφοράς και για ΘΚ1 στους 250 και 300°C.



**Διάγραμμα 6.5** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης (a-N) ελάσματος Alclad 2024-T3 σε σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής πριν και μετά από θερμική κατεργασία σταθερής θερμοκρασίας για πειραματικές μεταβλητές του αρχικού ελάσματος

**Πίνακας 6.4** Σταθερές Paris και προγράμματος LTSM-F ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από ΘΚ1

	C	n	A	$\beta$	$K_{cr} (LTSM)$
Μέταλλο αναφοράς Re	$3,52 \times 10^{-10}$	2,09	$7,8234 \times 10^{-5}$	1.973	60
ΘΚ1 στους 250°C για 15 ώρες, F250	$2,27 \times 10^{-10}$	2,09	$7,8234 \times 10^{-5}$	1.973	60
ΘΚ1 στους 300°C για 15 ώρες F300	$1,1456 \times 10^{-10}$	2,09	$7,8234 \times 10^{-5}$	1.973	60



**Διάγραμμα 6.6** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 σε σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής πριν και μετά από θερμική κατεργασία σταθερής θερμοκρασίας για πειραματικές μεταβλητές του αρχικού ελάσματος

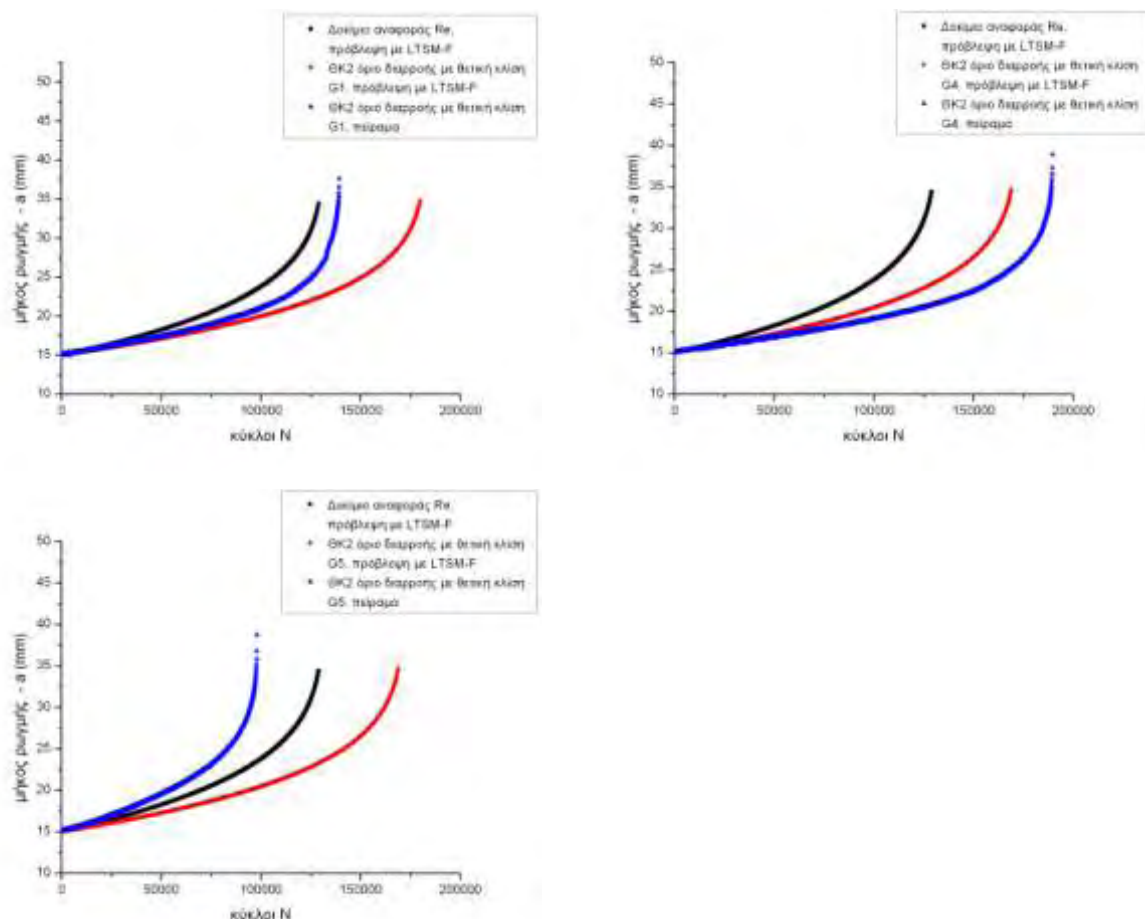
Από τα **Διαγράμματα 6.5-6** προκύπτει πολύ καλή συμφωνία της αναλυτικής πρόβλεψης με τα πειραματικά αποτελέσματα όσον αφορά τους ρυθμούς εξέλιξης ρωγμής για τα δοκίμια αναφοράς και με θερμικές κατεργασίες ΘΚ1 στους 250 και 300°C.

## 6.2 Αναλυτικά αποτελέσματα για υλικό με μεταβαλλόμενο όριο διαρροής (ΘΚ2)

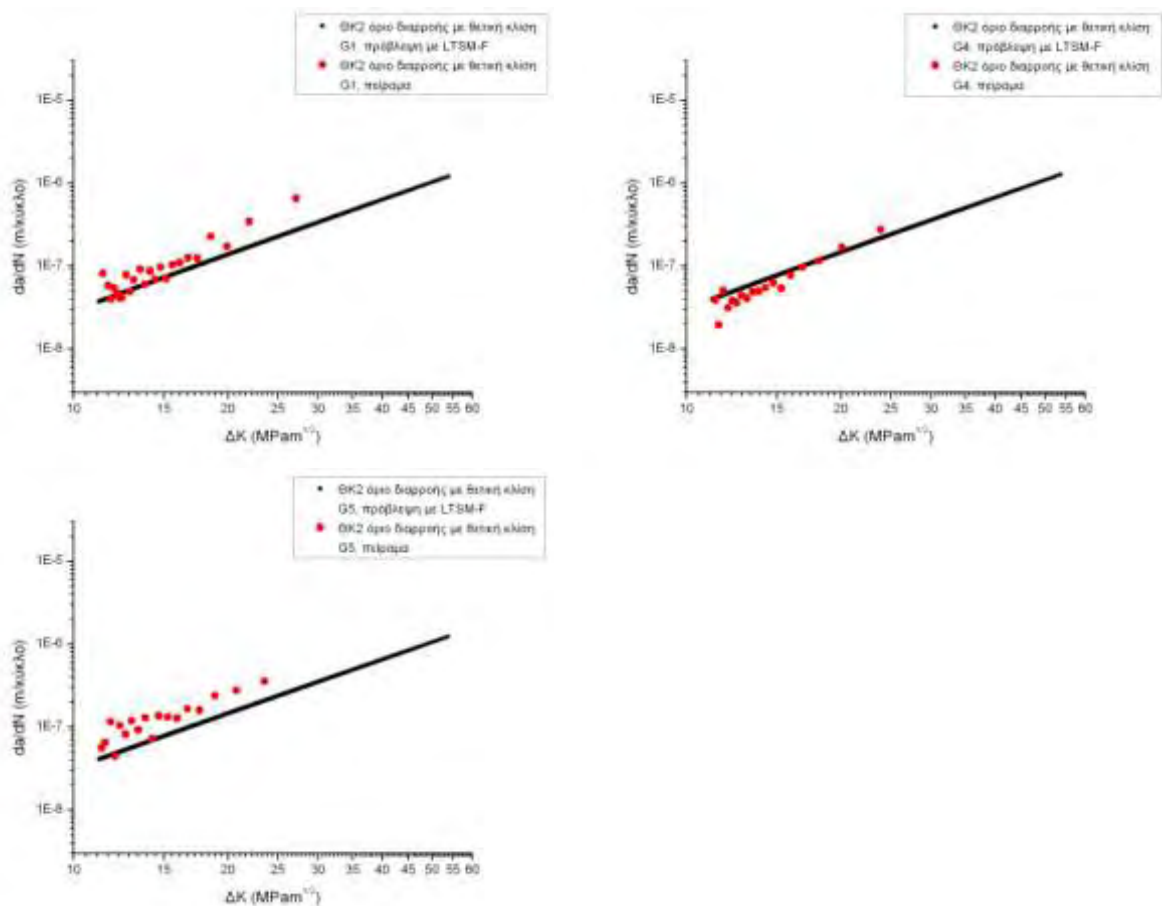
Εν συνεχεία μελετήθηκε η απόκριση του μοντέλου σε πρόβλεψη του ρυθμού διάδοσης ρωγμής λόγω κόπωσης όταν το υλικό παρουσιάζει μεταβαλλόμενο όριο διαρροής μπροστά από την αιχμή της ρωγμής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν σταθερές τιμές παραμέτρων  $A$  και  $\beta$  που ελήφθησαν από το υλικό αναφοράς. Η

μεταβολή της τιμής του ορίου διαρροής καθώς η ρωγμή διαδίδεται, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του συντελεστή  $C$  της εξίσωσης του Paris σε κάθε κύκλο καταπόνησης. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του μοντέλου LTSM-F για δοκίμια με ΘΚ2 για τις περιπτώσεις: i) θετική και ii) αρνητική κλίση του ορίου διαρροής. Η αρχική ρωγμή μήκους 15mm κατά τη θραύση έχει τελικό μήκος περίπου 35mm. Επομένως, από την μεταβολή του ορίου διαρροής των δοκιμίων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5.5 η οποία ήταν σε πλάτος 40mm, η ρωγμή διαδόθηκε μέχρι τη μέση αυτής της μεταβολής.

### 6.2.1 Μεταβαλλόμενο όριο διαρροής με θετική κλίση



**Διάγραμμα 6.7** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με θετική κλίση (Διαγράμματα  $a-N$ ) σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής



**Διάγραμμα 6.8** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος AlClad 2024-T3 μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με θετική κλίση

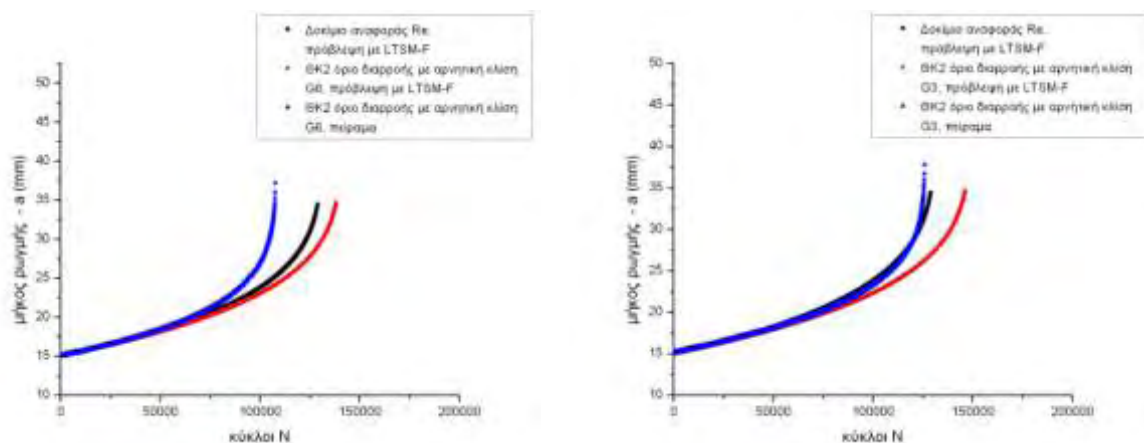
**Πίνακας 6.5** Αρχικές τιμές ρυθμού διάδοσης & αριθμός κύκλων μέχρι τη θραύση δοκιμίων μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής θετικής κλίσης και υπολογισμός μοντέλου

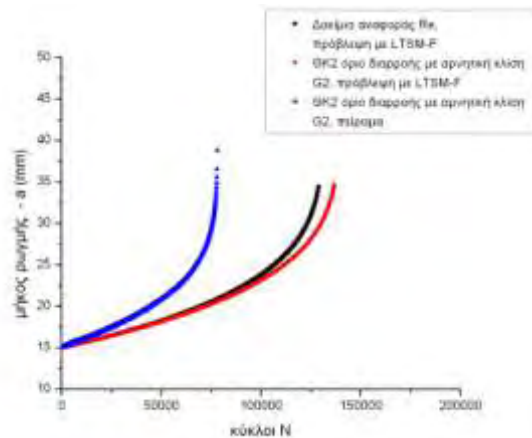
Δοκίμιο		Διάρκεια ζωής $N_f$ (κύκλοι)	Αρχική ταχύτητα διάδοσης ρωγμής $da / dN$ (m / κύκλος)
Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)	Re (LTSM-F)	128.900	$5.48 \times 10^{-8}$
ΘK2 θετικής κλίσης	G1 (LTSM-F)	179.700	$3.71 \times 10^{-8}$
	G1 (experimental)	139.300	$4.7 \times 10^{-8}$
	G4 (LTSM-F)	168.900	$3.96 \times 10^{-8}$
	G4 (experimental)	189.500	$3.9 \times 10^{-8}$
	G5 (LTSM-F)	167.600	$4.06 \times 10^{-8}$
	G5 (experimental)	98.000	$8.35 \times 10^{-8}$

Από τα **Διαγράμματα 6.7-8** παρατηρείται ότι το μοντέλο υπολογίζει μια αύξηση της διάρκειας ζωής του δοκιμίου όταν υπάρχει θετική κλίση στο όριο διαρροής μπροστά από τη ρωγμή με τα χαρακτηριστικά των παραπάνω δοκιμίων σε σχέση με το αρχικό έλασμα. Συγκρίνοντας την πρόβλεψη του μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα, προκύπτει ότι υπάρχει καλή συμφωνία του μοντέλου ως προς το πείραμα με μια απόκλιση της τάξεως του 20% για τα 2 από τα 3 δοκίμια. Ας σημειωθεί εδώ ότι η σειρά αυτή δοκιμίων με ΘΚ2 με μεταβαλλόμενο όριο διαρροής θετικής κλίσης παρουσίασε μια σημαντική πειραματική διασπορά αποτελεσμάτων. Στα διαγράμματα του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής με το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων, παρατηρούμε ότι τα πειραματικά αποτελέσματα περιγράφονται αρκετά καλά από το μοντέλο. Το ίδιο ισχύει και για τις αρχικές τιμές του ρυθμού διάδοσης κατά την έναρξη της φόρτισης που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.5**. Οι τιμές του μοντέλου είναι πολύ κοντά με τις πειραματικές, με εξαίρεση το δοκίμιο G5 στο οποίο υπάρχει κάποια απόκλιση.

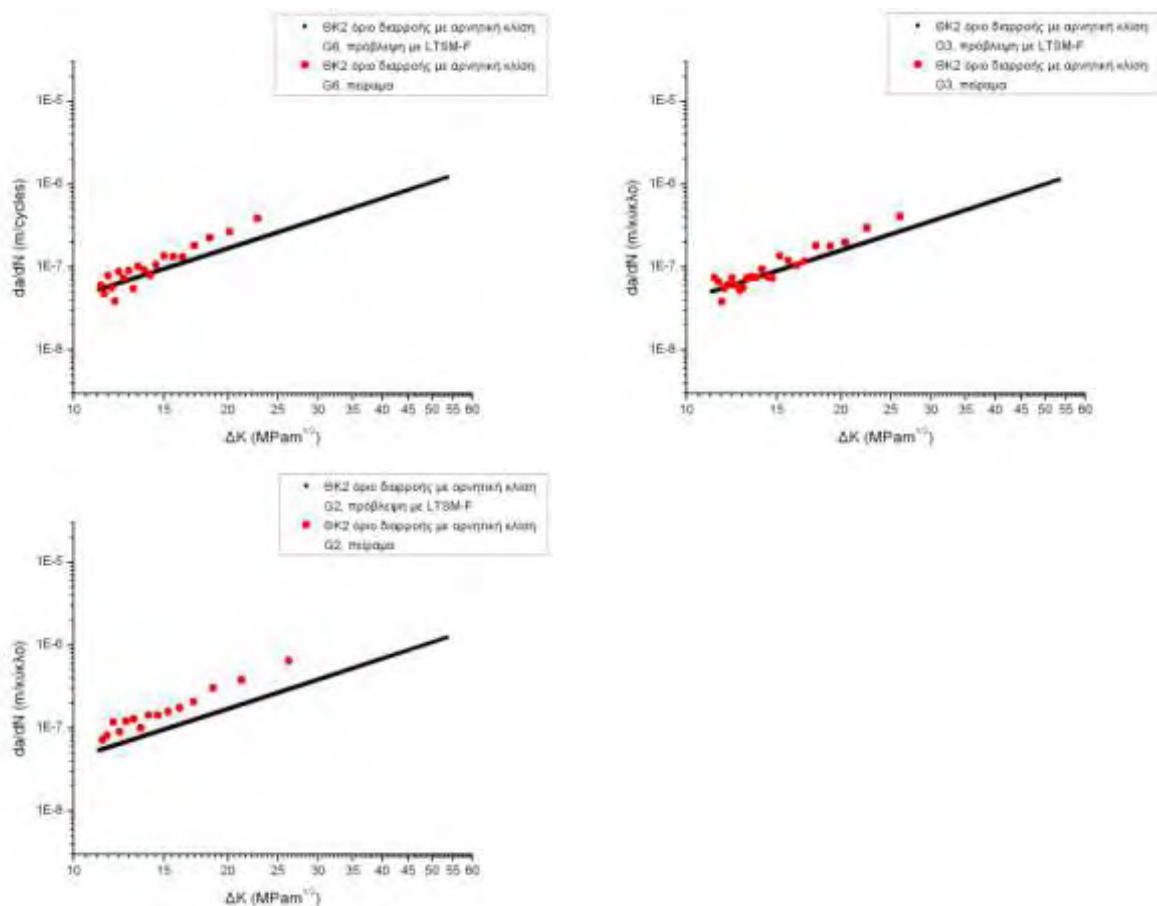
#### 6.2.2 Μεταβαλλόμενο όριο διαρροής με αρνητική κλίση

Στα **Διαγράμματα 6.9-10** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του μοντέλου LTSM-F για δοκίμια με ΘΚ2 για την περίπτωση που εμφανίζεται αρνητική κλίση του ορίου διαρροής.





**Διάγραμμα 6.9** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με αρνητική κλίση (Διαγράμματα  $a-N$ ) σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής



**Διάγραμμα 6.10** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN-\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με αρνητική κλίση

**Πίνακας 6.6** Αρχικές τιμές ρυθμού διάδοσης & αριθμός κύκλων μέχρι τη θραύση δοκιμίων μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής αρνητικής κλίσης και υπολογισμός μοντέλου

Δοκίμιο		Διάρκεια ζωής $N_f$ (κύκλοι)	Αρχική ταχύτητα διάδοσης ρωγμής $da / dN (m / \text{κύκλος})$
Μέταλλο αναφοράς (αρχική T3)	Re (LTSM-F)	128.900	$5.48 \times 10^{-8}$
ΘΚ2 αρνητικής κλίσης	G6 (LTSM-F)	138.200	$5.33 \times 10^{-8}$
	G6 (experimental)	107.600	$6.6 \times 10^{-8}$
	G3 (LTSM-F)	146.200	$5.04 \times 10^{-8}$
	G3 (experimental)	125.800	$6 \times 10^{-8}$
	G2 (LTSM-F)	136.800	$5.36 \times 10^{-8}$
	G2 (experimental)	78.000	$9.6 \times 10^{-8}$

Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι η πρόβλεψη με το μοντέλο είναι σε πολύ καλή συμφωνία με το πείραμα. Η αναλυτική πρόβλεψη υπολογίζει μια μικρή αύξηση της διάρκειας ζωής που ανέρχεται σε μέσο όρο 9%. Το πιο σημαντικό είναι ότι το μοντέλο μπορεί και προβλέπει επιτυχώς την αλλαγή της συμπεριφοράς που επιφέρει η επίδραση του μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής στο υλικό σε σχέση με το δοκίμιο αναφοράς όπως φαίνεται και στα **Διαγράμματα 6.9** Δηλαδή προβλέπει την ‘καθυστέρηση’ στην εξέλιξη του ρήγματος σε σχέση με τα δοκίμια αναφοράς που οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Και στα **Διαγράμματα 6.10** του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής με το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων, τα πειραματικά αποτελέσματα περιγράφονται αρκετά καλά από το μοντέλο. Το ίδιο ισχύει και για τις αρχικές τιμές του ρυθμού διάδοσης κατά την έναρξη της φόρτισης που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 6.6** Βλέπουμε ότι οι τιμές του μοντέλου είναι πολύ κοντά με τις πειραματικές.

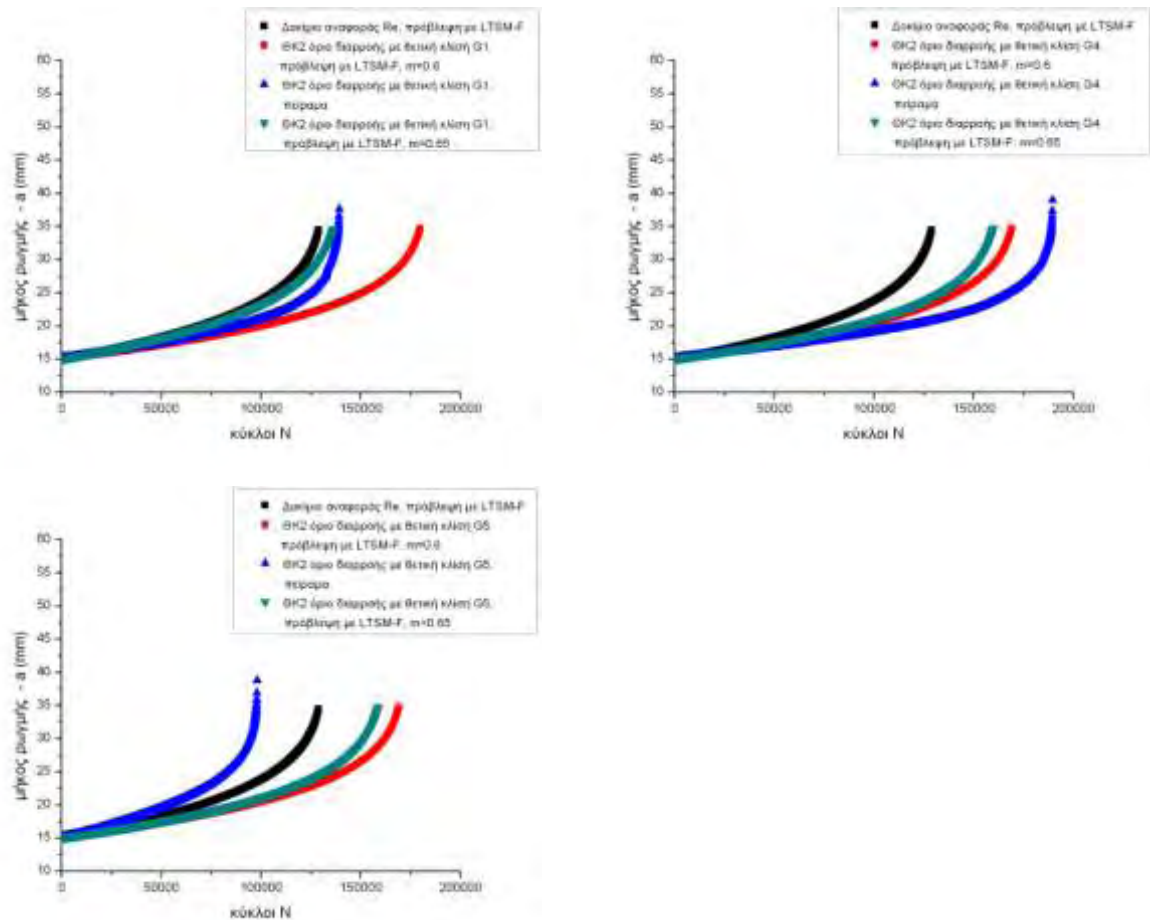


### 6.3 Επίδραση της εμπειρικής παραμέτρου $m$ (συντελεστής ολκιμότητας)

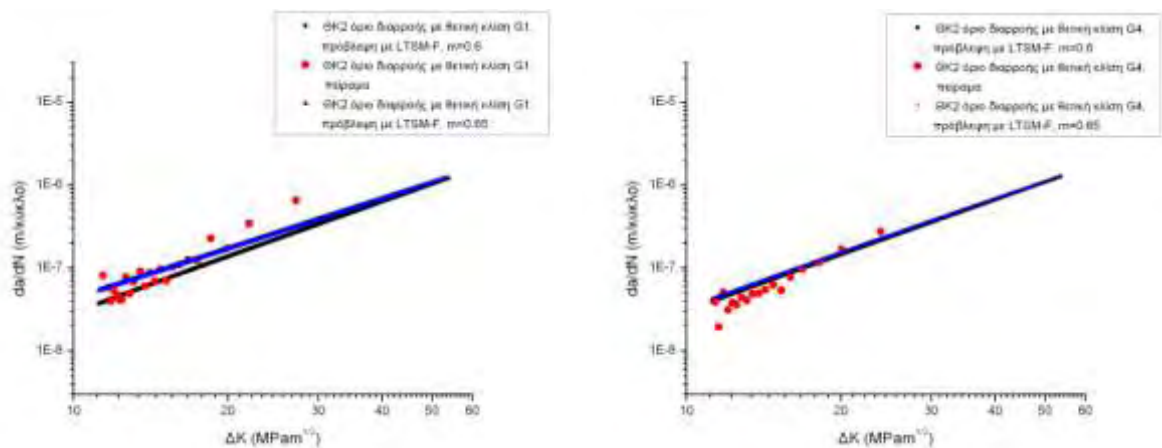
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, στους υπολογισμούς με τον κώδικα LTSM-F χρησιμοποιήθηκε η παράμετρος ολκιμότητας με τιμή  $m = 0.6$ . Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στη σχέση Coffin-Manson για συνθήκες ολιγοκυκλικής κόπωσης. Ο εκθέτης ολκιμότητας είναι η κλίση της καμπύλης στο διάγραμμα του πλάτους της κυκλικής πλαστικής παραμορφώσεως σε συνάρτηση με τις αναστροφές του φορτίου μέχρι την αστοχία (διάγραμμα  $\epsilon'_f - N_f$ ) και υπολογίζεται πειραματικά. Δεδομένου ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα αποτελέσματα από πειράματα ολιγοκυκλικής κόπωσης ώστε να είναι γνωστή η τιμή του εκθέτη  $m$ , παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με χρήση του εκθέτη με τιμή 0.65 και γίνεται σύγκριση με τα αποτελέσματα ώστε να φανεί η ευαισθησία του μοντέλου ως προς τη συγκεκριμένη μεταβλητή. Όπως και προηγουμένως, για την νέα τιμή του συντελεστή ολκιμότητας, υπολογίσθηκαν τα νέα  $A$  και  $b$  για το αρχικό έλασμα χρησιμοποιώντας τα πειραματικά  $C$ ,  $n$  και στη συνέχεια για τις τιμές αυτές έγινε χρήση του μοντέλου για τις περιπτώσεις του μεταβαλλόμενου γραμμικά ορίου διαρροής. Στο **Πίνακα 6.7** γίνεται σύγκριση των μεταβλητών για τις 2 περιπτώσεις και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα:

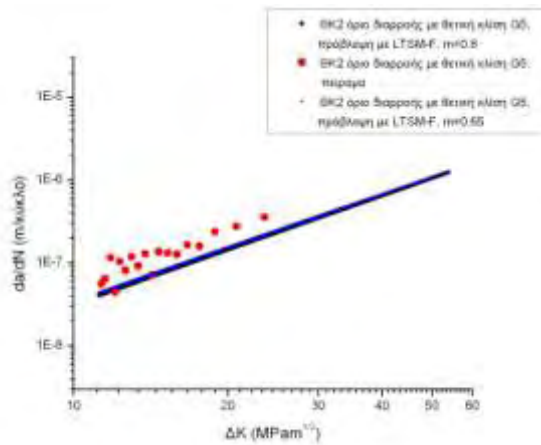
**Πίνακας 6.7** Εμπειρικοί μεταβλητές μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν

	$m$	$A$	$b$
Περίπτωση 1	0.6	$7,8234 \times 10^{-5}$	1,973
Περίπτωση 2	0.65	$5,5178 \times 10^{-5}$	1.9708

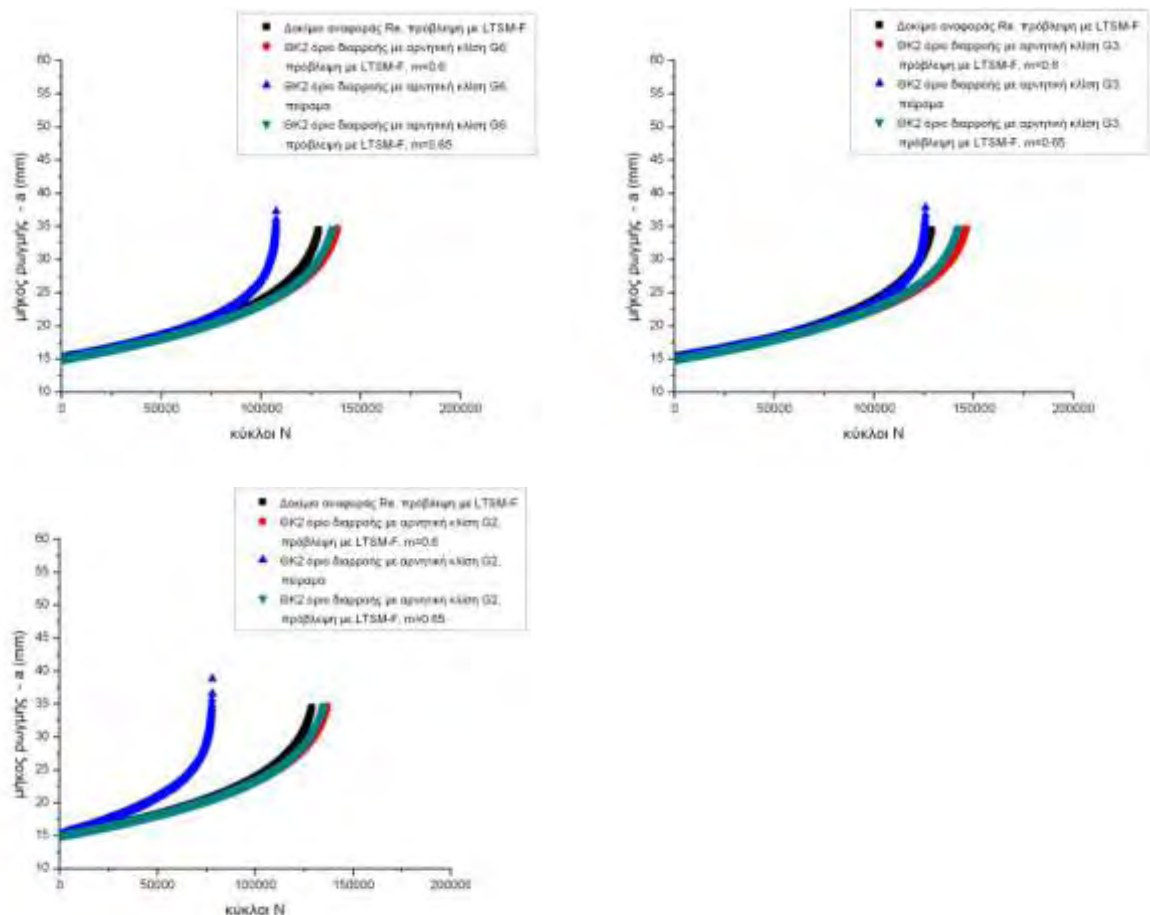


**Διάγραμμα 6.11** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με θετική κλίση (Διαγράμματα  $a-N$ ) σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής για  $m=0.6$  &  $m=0.65$

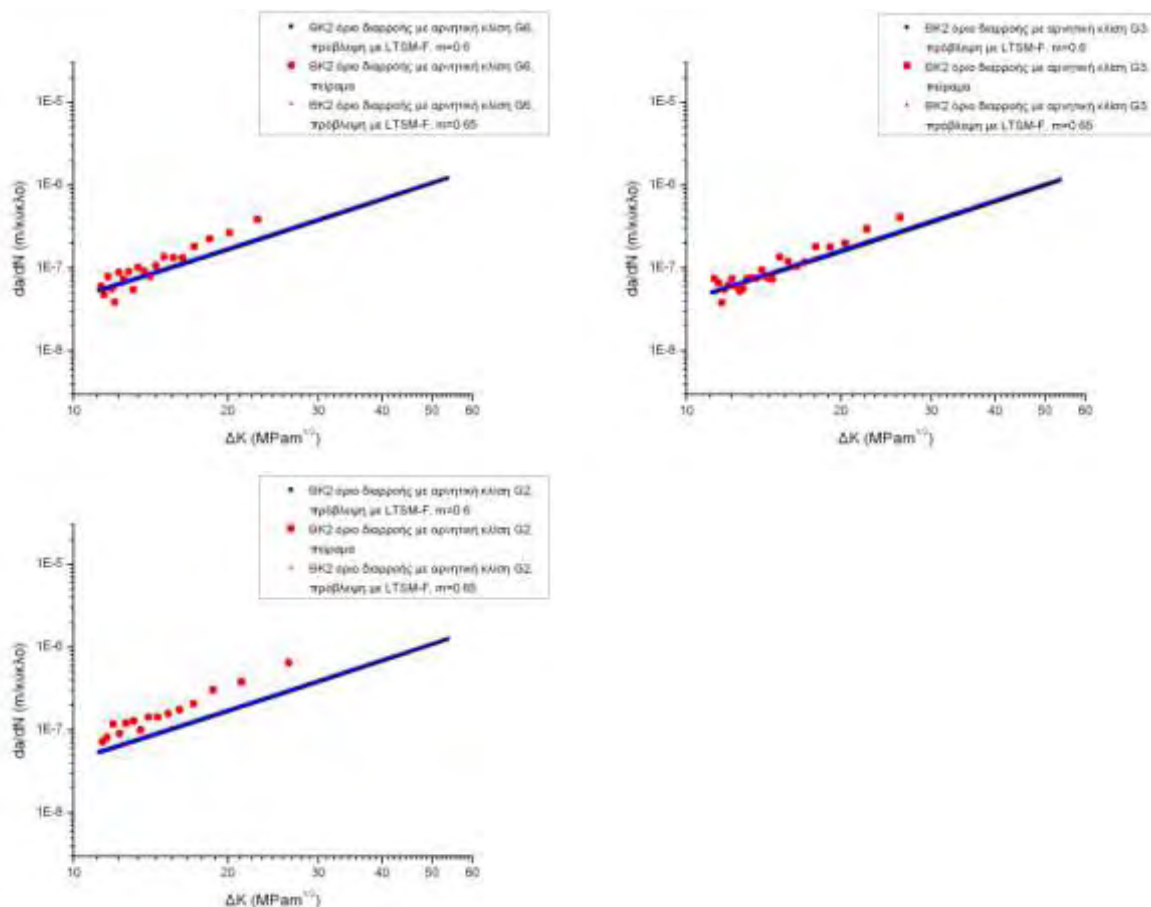




**Διάγραμμα 6.12** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος Alclad 2024-T3 μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με θετική κλίση



**Διάγραμμα 6.13** Καμπύλες εξέλιξης ρωγμής με τους κύκλους καταπόνησης αρχικού ελάσματος Alclad 2024-T3 πριν και μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με αρνητική κλίση (Διαγράμματα  $a$ - $N$ ) σχέση με μοντέλο εξέλιξης ρωγμής για  $m=0.6$  &  $m=0.65$



**Διάγραμμα 6.14** Καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής ( $da/dN$ - $\Delta K$ ) με το εύρος συντελεστή έντασης τάσεων ελάσματος AlClad 2024-T3 μετά από δημιουργία μεταβαλλόμενου ορίου διαρροής με αρνητική κλίση

Από τα **Διαγράμματα 6.11-14** φαίνεται ότι το μοντέλο παρουσιάζει κάποια ευαισθησία στις μεταβολές της παραμέτρου  $m$ . Μια αύξηση του  $m$  από 0.6 σε 0.65 οδηγεί σε μετατόπιση της καμπύλης εξέλιξης ρωγμής με κύκλους καταπόνησης πιο κοντά στην καμπύλη του αρχικού ελάσματος. Όσο αφορά τις καμπύλες ρυθμού εξέλιξης ρωγμής με το εύρος του συντελεστή έντασης των τάσεων, δεν παρατηρούνται τόσο αισθητές μεταβολές.

## 7. Συζήτηση των αποτελεσμάτων – Συμπεράσματα – Προτάσεις

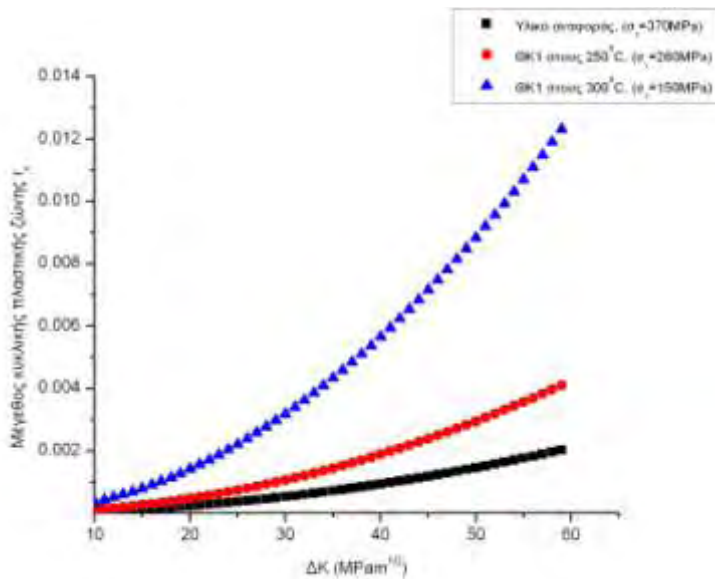
Στο παρόν κεφάλαιο, γίνεται συζήτηση των βασικών αποτελεσμάτων και εξάγονται συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

### Θερμική κατεργασία – Υπεργήρανση – Εξέλιξη ρωγμής κράματος 2024

Οι θερμικές κατεργασίες υπεργήρανσης ΘΚ1 και ΘΚ2 που επιλέχθηκαν οδήγησαν σε μεταβολή (μείωση) του ορίου διαρροής του υλικού που είχε ως συνέπεια την επίδραση στον ρυθμό εξέλιξης ρωγμής στο κράμα 2024. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι οι τοπικά μεταβαλλόμενες μηχανικές ιδιότητες στο υλικό μπορεί να επηρεάσουν την συμπεριφορά σε κόπωση και την εξέλιξη του ρήγματος.

Συγκεκριμένα, η σταθερή μείωση του ορίου διαρροής οδηγεί σε αύξηση της διάρκειας ζωής σε κόπωση και σε πιο αργούς ρυθμούς εξέλιξης ρωγμής στο υλικό. Ο μηχανισμός που οδηγεί σε μείωση του ρυθμού εξέλιξης δεν είναι προφανής εκ των προτέρων. Καταρχήν, η μείωση του ορίου διαρροής του υλικού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους κυκλικής πλαστικής ζώνης  $r_c = \frac{1}{\pi} \left( \frac{\Delta K}{2\sigma_y} \right)^2$  [15]

κάτι που μπορεί να συνεισφέρει σε μεγαλύτερο πεδίο θλιπτικών ιδιοτάσεων στην κορυφή της ρωγμής με αποτέλεσμα να ‘κλείνουν’ σε μεγαλύτερο βαθμό τα χείλη της κατά την κυκλική φόρτιση. Η εξέλιξη του  $r_c$  με το εύρος συντελεστή έντασης τάσης δίνεται στο **Διάγραμμα 7.1** για τις καταστάσεις του υλικού αναφοράς και του υλικού με ΘΚ1 στους 250 και 300°C.



**Διάγραμμα 7.1** Μέγεθος κυκλικής πλαστικής ζώνης σε σχέση με το εύρος συντελεστή έντασης τάσης για το υλικό αναφοράς και για υλικό με ΘΚ1 στους 250 και 300°C

Δεύτερον, η μελέτη της μικροδομής έδειξε ότι η θερμική κατεργασία στην οποία υποβλήθηκε το υλικό οδήγησε σε διεύρυνση της φάσεως ισχυροποίησης η οποία δικαιολογεί και την μείωση του ορίου διαρροής του υλικού. Η επίδραση της διεύρυνσης των σωματιδίων ισχυροποίησης στον ρυθμό εξέλιξης ρωγμής έχει μελετηθεί στην βιβλιογραφία [22,23], όπου αναφέρθηκαν περιπτώσεις μείωσης του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής λόγω αύξησης της τραχύτητας των επιφανειών θραύσης κατά την προώθηση του ρήγματος, φαινόμενο που οδηγεί σε ‘κλείσιμο’ των χειλέων της ρωγμής (Roughness induced crack closure (RICC)).

#### Θερμική κατεργασία – μεταβαλλόμενο όριο διαρροής

Για την περίπτωση της επίδρασης της θερμικής κατεργασίας υπεργήρανσης ΘΚ2 που οδηγεί σε γραμμική μείωση του ορίου διαρροής στο άκρο της ρωγμής στον ρυθμό εξέλιξης ρωγμής, τα συμπεράσματα είναι πιο δυσδιάκριτα. Στην περίπτωση που η μεταβολή του ορίου διαρροής έχει θετική κλίση, η κλίση δείχνει να μην επηρεάζει σημαντικά την συμπεριφορά σε εξέλιξη ρωγμής λόγω κόπωσης του κράματος. Παρατηρήθηκαν συμπεριφορές των δοκιμών όμοιες με αυτές του αρχικού

ελάσματος. Αντίθετα, η αρνητική κλίση του ορίου διαρροής δείχνει να οδηγεί σε υποβάθμιση της συμπεριφοράς κόπωσης, αφού παρατηρήθηκαν υψηλότεροι ρυθμοί διάδοσης σε όλα τα δοκίμια.

Ας σημειωθεί εδώ ότι με δεδομένη την ύπαρξη πειραματικής διασποράς αποτελεσμάτων (κυρίως για την περίπτωση θετικής κλίσης του  $\sigma_y$ ) οι παραπάνω παρατηρήσεις διατυπώνονται με κάποια επιφύλαξη και χρειάζεται περαιτέρω πειραματική διερεύνηση για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων.

#### Πρόβλεψη εξέλιξης ρωγμής λόγω κόπωσης μέσω υπολογιστικού μοντέλου

Στο κομμάτι της αναλυτικής προσομοίωσης των πειραματικών αποτελεσμάτων η χρήση του κώδικα LTSM-F έδειξε καλή συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα και ότι ο κώδικας έχει την ικανότητα να λαμβάνει υπόψη του την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων λόγω θερμικής κατεργασίας στην πρόβλεψη του ρυθμού εξέλιξης ρωγμής σε θερμικά κατεργάσιμα μεταλλικά κράματα.

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την εκτίμηση της συμπεριφοράς σε κόπωσης κατασκευαστικών στοιχείων που μπορεί να παρουσιάζουν τοπικά μεταβαλλόμενες μηχανικές ιδιότητες όπως π.χ. η περιοχή γύρω από μια συγκόλληση, ή η περιοχή σε μια δομή που έχει υποστεί διαβρωτική προσβολή.

## 8. Βιβλιογραφία

- [1] Σπ.Παντελάκης, Αεροναυπηγικά Υλικά, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2004
- [2] Σπ.Παντελάκης, Μηχανική Συμπεριφορά Μεταλλικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2004
- [3] Κωνσταντίνος Μαλλιαρός, 'Προσομοίωση Μεταβολής Μικροσκληρότητας στη ΘΕΖ συγκόλλησης με ισόθερμες θερμικές κατεργασίες', Μεταπτυχιακή Εργασία, ΤΜΜΒ, 2008
- [4] Κερμανίδης Αλέξης, Επίδραση της διάβρωσης στην δομική ακεραιότητα ελαφρών κατασκευών από κράμα Αλουμινίου 2024, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003
- [5] F. Sarioglu, F.Orhaner, Effect of prolonged heating at 130°C on fatigue crack propangation of 2024 Al alloy in three orientations, Materials science & engineering A248 115-119, 1998
- [6] A.May, M.A. Belouchrani, S Taharboucht, A. BoudrasInfluence of heat treatment on the fatigue behaviour of two aluminium alloys 2024 and 2024 plated, Procedia Enginnering 2 1795-1804, 2010
- [7] Al. Th. Kermanidis, Sp. G. Pantelakis, 'Fatigue Crack Growth Analysis of 2024 T3 Aluminum Speciments Under Aircraft Service Spectra'
- [8] Δρ. Σπ.Α. Παπαευθυμίου, Βελτιστοποίηση των μεθόδων συγκόλλησης στα κράματα Al της σειράς 5 xxx, Ήρων 2006-7
- [9] ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys, ASM INTERNATIONAL
- [10] Τζαμτζής Ανδρέας, Συγκολλήσεις MIG λεπτών ελασμάτων κράματος Al 5083: Επίδραση παραμέτρων και χαρακτηρισμός, Διπλωματική εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2007
- [11] Σταύρος Β. Καραπατάκης, 'Σχεδίαση – Τεχνολογία κατασκευής και Βιομηχανοποίηση Παραγωγής Ολισθακάτων Αλουμινίου', Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, 2008
- [12] Γρ.Ν. Χαϊδεμενόπουλος, Φυσική Μεταλλουργία, εκδόσεις Τζιόλα, 2007
- [13] Zainul Huda, Nur Iskandar Taib, Tuan Zaharinie, Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy, Materials Chemistry and Physics, Volume 113, Issues 2-3, 15 February 2009, Pages 515-517
- [14] Μηχανική των Θραύσεων, Θ.Κερμανίδης, Πάτρα 2004



- [15] S. Suresh, 'Fatigue of Materials', Second Edition, Cambridge
- [16] ASTM E647-00, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International 2000
- [17] ASTM E561-98, Standard Practice for R-Curve Determination, ASTM International 1998
- [18] A. Saxena and S. J. Hudak, Jr, Review and extension of compliance information for common crack growth specimens, *Int. J. Fracture* 14, 453-468 (1978)
- [19] ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures, ASM INTERNATIONAL
- [20] R.I. Stephens, A. Fatemi, R.R. Stephens, H.O. Fuchs, 'Metals Fatigue in Engineering', Second Edition, Wiley Interscience
- [21] Norman E. Dowling, 'Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue', Third Edition, Pearson Prentice Hall
- [22] L. Venning, S.C. Hogg, I. Sinclair, P.A.S. Reed, 'Fatigue crack growth and closure in fine-grained aluminium alloys, *Materials Science & Engineering A* 428 247-255, 2006
- [23] N. Kamp, N. Gao, M.J. Starink, I. Sinclair, 'Influence of grain structure and slip planarity on fatigue crack growth in low alloying artificially aged 2xxx aluminium alloys', *International Journal of Fatigue* 29 869-878, 2007
- [24] T.L. Anderson, 'Fracture Mechanics, Fundamentals and Applications', Third Edition, Taylor & Francis group
- [25] ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM INTERNATIONAL
- [26] <http://asm.matweb.com/>
- [27] <http://www.matweb.com>